

In welchem Maße bringen Waldbrände Gefahren aufgrund von Kampfmitteln im Boden mit sich?

Berechnung der Temperaturverteilung in einem Bodenprofil
während des Verlaufs von Brandereignissen und
in der nachfolgenden Abkühlungsphase



Eine Studie für das Niedersächsische Landesamt für Bau und Liegenschaften
Leitstelle des Bundes für Kampfmittelräumung
Waterloostraße 4
30169 Hannover
Kontakt: Dr. H. Preetz

angefertigt von

Dr. agr. J. Hagenau
Ingenieurdienstleistungen
Krokusweg 29
06118 Halle (Saale)

Prof. Dr. H. Borg
Naturwissenschaftliche Fakultät III
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
06099 Halle/Saale

September 2019

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
1. Hintergrund	1
2. Temperaturen und Dauer von Brandereignissen	4
3. Herleitung der relevanten Gleichungen zur Berechnung der eindimensionalen vertikalen Wärmeausbreitung in Böden bei einem Brand an der Bodenoberfläche	8
4. Anfangs- und Randbedingungen	14
4.1 Anfangsbedingungen	14
4.2 Randbedingungen	23
5. Computerprogramm	27
5.1 Allgemeines	27
5.2 Liste der Variablen	29
5.3 Programmcode	30
5.4 Programmbeschreibung	33
6. Beispielrechnungen	38
7. Literaturverzeichnis	44

Zusammenfassung

Sowohl die Häufigkeit als auch die Heftigkeit von Waldbränden ist in einigen Teilen Deutschlands in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Dabei sind Nadelwälder, die vielerorts anstelle der natürlichen Laubmischwälder stehen, für Brände besonders anfällig.

In etlichen Waldgebieten liegen Kampfmittel aus verschiedenen Epochen im Boden. Diese erschweren einerseits die Brandbekämpfung, weil sie den Löschmannschaften keinen sicheren Zutritt erlauben, andererseits können Detonationen immer wieder zum erneuten Aufflammen von Bränden führen. Eine Räumung der Kampfmittel ist in solchen Gebieten daher ein wichtiger Beitrag zur Brandbekämpfung. Sie müssen bis zu einer Tiefe entfernt werden, in der infolge eines Waldbrandes noch Temperaturen erreicht werden können, bei denen die Munition detoniert. Diese Tiefe hängt hauptsächlich von drei Faktoren ab:

- 1) Temperatur des Brandes an der Bodenoberfläche.
- 2) Dauer des Brandes.
- 3) Thermische Diffusivität (D_{th}) des Bodens.

Eine Literaturrecherche ergab, dass bei Waldbränden die Temperatur an der Bodenoberfläche meist zwischen 200 und 700°C liegt und durch die Menge des brennbaren Materials bedingt wird. Zur Dauer von Waldbränden (an einen bestimmten Punkt) gibt es wenig quantitative Aussagen. Die Flammen haben meist nur eine kurze Verweildauer (Minuten). Die darauf folgenden Schwelbrände dauern wesentlich länger, oft mehrere Stunden und manchmal sogar Tage.

Die thermische Diffusivität (D_{th}) ist der entscheidende Transportkoeffizient für Wärme im Boden (und im Text näher erläutert). Sie hängt von der Bodenart und, insbesondere bei Sanden, vom Wassergehalt des Bodens ab. In der Literatur sind Werte für verschiedene Bodenarten gut dokumentiert. Die Bodenart am zu betrachtenden Standort kann man mit einiger Sicherheit ermitteln und somit auch einen ungefähren Wert für D_{th} .

Um die Temperaturen zu berechnen, die in einem Waldboden in unterschiedlichen Tiefen während und nach dem Abklingen eines Waldbrands entstehen können, wurde in dieser Arbeit eine numerische Lösung der Transportgleichung für Wärme im Boden in vertikaler Richtung hergeleitet und in einem Computerprogramm umgesetzt. Mit dieser Grundlage kann abgeschätzt werden, in welchen Tiefen die unterschiedlichen Sprengstoffarten bei einem Waldbrand zur Umsetzung gelangen können. Die wichtigsten Eingabeparameter für das Programm sind die Brandtemperatur und -dauer sowie die D_{th} -Werte im Bodenprofil.

Eine numerische Lösung wurde gewählt, weil sie es ermöglicht, unterschiedliche Ausgangstemperaturen und thermische Diffusivitäten (D_{th}) in den einzelnen Bodensegmenten zu verwenden. Das ist mit einer analytischen Lösung nicht möglich. Die hier präsentierte explizite Lösung mit finiten Differenzen ist mathematisch nicht die

eleganteste Variante, aber für Personen, die sich nicht mit numerischen Methoden auskennen, leicht verständlich. Sie erhielt daher den Vorzug.

Anhand von Beispielrechnungen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Temperaturen im Bodenprofil zu Beginn eines Brandes haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Höhe der Temperaturen, die dort letztlich durch ein Feuer hervorgerufen werden.
- Je höher die Brandtemperatur, desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.
- Je länger die Branddauer, desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.
- Je höher D_{th} , desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.
- In der Abkühlungsphase, wenn der Brand an der Bodenoberfläche schon erloschen ist, kann die Temperatur in der Tiefe noch ansteigen, auch wenn sich die Bodenoberfläche bereits stark abgekühlt hat.
- Da D_{th} für organische Stoffe wesentlich niedriger ist als für mineralische, reduziert eine Humusaufgabe das Eindringen der Wärme aus einem Feuer. Mit Humusaufgabe sind die Bodentemperaturen daher in jeder Tiefe geringer als ohne.
- Die Wärme aus einem Feuer kann vor allem in Sandböden zu Verdunstung von Wasser aus den oberen Bodenschichten führen. Dadurch verringert sich D_{th} und das Eindringen der Wärme aus einem Feuer wird reduziert. Mit Verdunstung sind die Bodentemperaturen daher in jeder Tiefe geringer als ohne.
- Je nach Temperatur eines Brandes an der Bodenoberfläche und den D_{th} -Werten im Bodenprofil sind in Tiefen > 30 bis > 60 cm keine Temperaturen mehr zu erwarten, die zur Explosion von Munition führen können.

Im Voraus weiß man nicht, welche Temperatur ein Brand entwickeln wird und wie lange er andauern wird. Auch die D_{th} -Werte sind nicht genau bekannt, allerdings sind sie weniger unsicher als die Temperatur und die Dauer eines Brandes. Zur Gefährdungsabschätzung muss man daher Berechnungen mit einer Bandbreite von Werten für diese drei Parameter durchführen.

Eine wichtige Erkenntnis der Beispielrechnungen liegt darin, dass die Temperaturen in der Tiefe des Bodens nach Abklingen des Brandes noch längere Zeit hoch sind und teilweise auch noch über mehrere Stunden zunehmen. „Feuer aus“ bedeutet somit noch längst nicht „Boden kalt“. Die Rechnungen zeigen aber auch, dass sich durch Waldbrände hervorgerufene Temperaturerhöhungen im Boden auf Tiefen von wenigen Dezimetern beschränken.

1. Hintergrund

In Deutschland hat sich die Zahl der Waldbrände in den letzten Jahren dramatisch erhöht. Nicht nur die Anzahl der einzelnen Ereignisse hat zugenommen, sondern auch die flächenmäßige Ausdehnung, die Zeitdauer sowie die damit verbundenen Schäden. Mit deutschlandweit 1.708 Waldbränden, dem höchsten Wert seit 15 Jahren, war bereits das Jahr 2018 ein deutlich überdurchschnittliches Waldbrandjahr im Vergleich zum mehrjährigen Mittel der Jahre 1993 bis 2017 (Umweltbundesamt, 2019). Das Vorhandensein von Nadelwäldern an Stelle der natürlichen Vegetation, die fast überall in Deutschland aus Laubmischwäldern besteht, ist dieser Entwicklung zuträglich. Hitze und Trockenheit in Verbindung mit der Vegetation tragen dazu bei, dass es vermehrt brennt. Diese Faktoren verstärken sich bei Brandereignissen gegenseitig.

Das Auftreten von Waldbränden ist in Deutschland aufgrund der klimatischen und hydrologischen Gegebenheiten und der vorherrschenden Waldbestockung regional unterschiedlich. Im Ergebnis sind weite Teile Nordostdeutschlands, das östliche Nordwestdeutschland und das Oberrheinische Tiefland häufiger von Waldbränden betroffen. (Umweltbundesamt, 2019). Zu den Schäden an der Substanz der Wälder sowie an baulichen Einrichtungen kommen noch die enormen Belastungen und Aufwendungen hinzu, die mit der Bekämpfung der Waldbrände einhergehen. Die meist freiwilligen Kräfte von Feuerwehren und anderen Organisationen des Katastrophenschutzes arbeiteten in den letzten beiden Sommern häufig am Limit.

Darüber hinaus sind etliche Waldgebiete dadurch belastet, dass sich in ihren Böden Kampfmittel aus verschiedenen Epochen befinden. Diese erschweren einerseits die rasche Brandbekämpfung, weil sie in einigen Arealen einen Zutritt für entsprechende Maßnahmen unmöglich machen, und andererseits durch Detonationen immer wieder zum Neu-Ausbrechen von Bränden führen können. Insgesamt gesehen ist deshalb eine maßvolle Räumung der Kampfmittel ein wichtiger Beitrag zur generellen Brandbekämpfung.

Mit maßvoller Räumung ist dabei gemeint, dass die Kampfmittel bis zu einer Tiefe zu entfernt werden, in der sie noch eine Gefahr bei kommenden Waldbränden darstellen würden. Hierfür wiederum sind die Temperaturen entscheidend, die ausreichen, um Detonationen auszulösen. Wie hoch diese Temperaturen sein müssen, ist abhängig von der Art der Kampfmittel und ist kein Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Der größte Waldbrand in Mecklenburg-Vorpommern seit dem Zweiten Weltkrieg, bei dem mehr als 1.200 Hektar Wald in Flammen standen, rückte das Thema „Waldbrände“ wieder verstärkt in den Fokus der Öffentlichkeit. Im Raum Lübtheen in Westmecklenburg waren dabei auch ausgedehnte Flächen betroffen, in denen sich immer noch eine große Menge an Kampfmitteln befindet. Sie stammen aus unterschiedlichen Epochen und von verschiedenen

Streitkräften: Aus dem zweiten Weltkrieg, aus der Zeit des kalten Krieges sowohl von der Sowjetarmee als auch von der NVA, sowie aus der Nutzung der Flächen durch die Bundeswehr.

Die Gefahr für alle an der Brandbekämpfung Beteiligten war hier sehr hoch, denn bei der Erhitzung dieser Kampfmittel über bestimmte Temperaturen besteht stets die Gefahr von unkontrollierten Detonationen. Solche Detonationen fanden beim Großfeuer um Lübtheen auch statt und trugen auch immer wieder zum erneuten Aufflammen von Arealen bei, die sich bereits in der Phase des Schwelens bzw. der Abkühlung befunden hatten.

Diese Gefahr wird bei der Brandbekämpfung in dem Maße beachtet, dass das Betreten der betroffenen Areale nach dem Durchziehen des offenen Feuers zur Bekämpfung der Glutnester eher abwartend erfolgt, um die Feuerwehrleute nicht in Gefahr zu bringen. So wurden im Raum Lübtheen bspw. Glutnester am Boden von bewässerten Schneisen eingezäumt, wobei von Anfang an auch bedacht worden war, dass diese Glutnester auch wieder aufflackern können (Zeit, 2019). Ein Betreten wäre aus oben genannten Gründen zu heikel gewesen. Ein solches Verhalten widerspricht jedoch der eigentlich am meisten erfolgversprechenden Strategie, die darin besteht, einen Waldbrand möglichst offensiv und somit schnellstmöglich komplett zu bekämpfen. Somit wird deutlich, dass die Räumung der Kampfmittel auch ein Mittel dafür ist, um das Potential künftiger Waldbrandgefahren zu reduzieren.

Ob Kampfmittel bei Waldbränden zur Detonation kommen, liegt daran, in wie weit sie von der Hitze erfasst werden, die sich während eines Waldbrandes im System Atmosphäre-Wald-Boden einstellt. Dies wiederum ist von zahlreichen anderen Faktoren abhängig, welche in der vorliegenden Arbeit untersucht werden sollen:

- Zunächst die Lage der Kampfmittel, wobei die Situation je gefährlicher ist, je näher sich die Kampfmittel an der Oberfläche befinden. Wenn eine offene Lage ohne Bodenabdeckung vorliegt, dann ist die Gefahr am größten.
- Die Parameter, welche das Feuer selbst kennzeichnen, hier vorrangig die Verweildauer des Feuers sowie die Temperatur an der Bodenoberfläche. Es besteht eine Abhängigkeit vom Bewuchs, von der Bodenbeschaffenheit sowie von den meteorologischen Bedingungen.
- Der Boden liefert mit seiner Zusammensetzung die wichtigste Voraussetzung für die Temperaturverteilung in die Tiefe. Außerdem kann der Boden einen wichtigen Einfluss darauf ausüben, ob sich ein offenes Feuer oder ein Schwelbrand entwickelt, bzw. inwieweit diese beiden Formen ineinander übergehen können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht deshalb darin, ein Instrument zur Verfügung zu stellen, mit dessen Hilfe sich die Eindringtiefe von bestimmten - detonationsfördernden -

Temperaturen in den Boden abschätzen lässt. Bei welchen Temperaturen für welche Art von Munition eine bestimmte Gefahr besteht, ist dabei nicht Inhalt der Arbeit. Das Instrument liefert lediglich die Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf der Temperatur im Boden in Tiefen bis 210 cm zu berechnen.

In Folge der klimatischen Entwicklung hin zu heißeren und trockeneren Sommern in ganz Deutschland steht zu befürchten, dass sich das Problem der Waldbrände noch weiter verschärfen wird. Deshalb sind zahlreiche Bausteine nötig, um die Waldbrandbekämpfung sowie die präventiven Maßnahmen zu optimieren. Kampfmittel sind dabei nur eines von zahlreichen Problemen, welche diese Optimierung stark erschweren.

2. Temperaturen und Dauer von Brandereignissen

Treibende Kräfte für die Temperaturerhöhung in der Tiefe des Bodens und somit die wichtigsten Eingabeparameter für das in Kapitel 3 vorgestellte Modell sind einerseits die Temperaturen, welche während des Brandereignisses an der Bodenoberfläche vorherrschen, und andererseits die Verweildauer eines Feuers am gleichen Platz. Die Auseinandersetzung mit verschiedenen Quellen zeigt, dass hier keine standardisierten und vor allem allgemeingültigen Zahlen zu finden sind und dass vielmehr eine Schätzung in Anlehnung an die Werte aus der Fachliteratur sowie an die jeweiligen Bedingungen vorzunehmen ist. Die Streuung der Werte der einzelnen Parameter ist dabei enorm.

Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen einem offenen Feuer mit einer relativ hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit und entsprechend kurzer Verweildauer, sowie einem Schwelbrand, der sich dadurch auszeichnet, dass die Verweildauer sehr hoch ist und die Temperaturen eher niedrig. Sie werden auch als Erdfeuer bezeichnet. Bei den offenen Feuern erfolgt zudem die Unterscheidung in Boden- oder Lauffeuer, bei denen Bäume nicht zwangsläufig verbrennen, und in Kronen- bzw. Vollfeuer, die entstehen, wenn die Bodenfeuer auf den Kronenbereich überschlagen. Hier ist der Verlust des gesamten Bestandes zu erwarten, zudem entstehen die höchsten Temperaturen (Umweltbundesamt, 2019).

Schwelbrände treten in Abhängigkeit vom Material auf und kommen vermehrt bei porösem organischem Material vor, das Vorhandensein von Laub spielt dabei eine wichtige Rolle. Ebenso besteht eine Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt und von den mineralischen Bestandteilen des Bodens. Schwelbrände dauern teilweise Tage (in anderen Gegenden der Welt manchmal sogar Jahre), die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei sehr niedrig und beträgt wenige cm pro Stunde. Schwelbrände treten nach offenem Feuer auf, aber ebenso können sich aus Schwelbränden wiederum offene Feuer entwickeln (Enniful, 2006, S. 15f.) Enniful bezeichnet die Temperaturen bei Schwelbränden insgesamt als „relativ niedrig“, gibt jedoch keine konkreten Zahlen an (ebd.).

Die Angaben zu Temperaturen, die am Boden unter offenen Feuern herrschen, schwanken zwischen 400°C und 1.500°C. Enniful gibt berechnete und gemessene Werte an, die bei maximal 710°C liegen. Diese Temperaturen werden an der Bodenoberfläche erreicht, wenn die Verbrennung mit 75 kW/m² über 5 Minuten anhält (Enniful, 2006, S. 63f.). Für einen solch hohen Energiefluss ist das Vorhandensein von zahlreichem Brennmaterial notwendig. Wenn nur mit 50 kW/m² verbrannt wird, dann erreicht die Temperatur nur 610°C, auch bei einer Dauer der Verbrennung von 10 Minuten.

Experimentell ermittelte Enniful eine Temperatur von 470°C in 1 cm Tiefe, wenn eine Verbrennung 5 Minuten lang bei 70 kW/m² von statten geht (ebd., S. 106). Insgesamt wird

davon ausgegangen, dass die Maximaltemperaturen an der Oberfläche nur wenige Minuten anhalten, weil aufgrund der Reduzierung des Brennmaterials am gleichen Ort ein so hoher Energiefluss nicht lange aufrechterhalten werden kann.

Sacket und Haase installierten bei realen Waldbränden Systeme zur Messung der Temperaturen an der Oberfläche sowie in verschiedenen Bodentiefen. Dabei wurden mehrere Dinge offensichtlich:

- Die Temperatur an der Oberfläche erreichte eine Spitze von etwa 260°C, welche etwa eine Stunde anhielt.
- Über etwa 24 Stunden wurden an der Oberfläche Temperaturen von mehr als 100°C gemessen.
- Unterhalb von etwa 15 cm wurden zu keinem Zeitpunkt Temperaturen von mehr als 66°C erreicht (Sacket & Haase, 1992, S. 8).

Mataix-Solera et al. (2009) führen unterschiedliche Verbrennungstemperaturen am Boden in Abhängigkeit vom Bewuchs an und weisen dabei darauf hin, dass auch die Spannen für die Temperaturen unterschiedlich sind. Dies äußert sich in folgenden Angaben:

- „durchschnittlicher“ Wald 200°C - 300°C
- Wald mit viel Brennmaterial 500°C - 700°C
- Wald, kurzfristige Spitzen < 1.500°C
- Buschgehölz 300°C - 700°C

Bei Feuerexperimenten in der Lausitz (Brandenburg), die vom DFNK-Cluster Waldbrand (2001) durchgeführt wurden, kam es an der Bodenoberfläche zu Temperaturen zwischen 420 und 700°C. Die höhere Temperatur entstand aufgrund einer dichten Grasschicht mit Durchforstungsresten am Boden. Diese Arbeit zeigt somit auch, dass die Menge an vorhandenem Brennmaterial einen wesentlichen Einfluss auf die Brandtemperatur ausübt.

Wieting et al. (2017) nehmen eine Unterteilung in Feuer mit hohen Temperaturen (450 - 500°C) und Feuer mit niedrigen Temperaturen (200 - 250°C) vor. Die durchschnittliche Brennzeit wird bei Waldbränden mit rund 40 Minuten angegeben, wobei keine Unterscheidung dahingehend vorgenommen wird, ob Feuer mit niedrigen Temperaturen länger anhalten, so wie es oben bereits herausgestellt wurde.

Im Gegensatz dazu stehen Beobachtungen bei Feuern in Eukalyptuswäldern, bei denen der Vorgang des Verbrennens mit 37 Sekunden angegeben wird (Wotton et al., 2012). Die Arbeit untersucht dabei hauptsächlich die Spitzentemperaturen der Feuer, die in mehreren Metern Höhe gemessen werden. Dabei wird erläutert, dass die Temperaturen umso höher sind, je länger die letzten Brände zurückliegen. Dies lässt sich mit der Akkumulation von brennbarem Material erklären. Die Temperaturen an der Bodenoberfläche werden von den Autoren

hingegen pauschal mit rund 300°C angegeben (ebd.). Stoof et al. (2013) nennen zwar Flammentemperaturen von etwa 800°C, fügen jedoch hinzu, dass die Temperaturen nach unten hin mit dem Erreichen des Bodens sofort deutlich zurückgehen. Auch bei Ellis (2013) werden Zeiten von nur wenigen Minuten angegeben, nach denen Feuer in Eukalyptuswäldern bereits wieder abklingen.

In mediterranen Buschwäldern, welche hauptsächlich Stechginster und Rosmarin enthalten und auch „Maquis“ genannt werden, wurden Bodentemperaturen von bis zu 500°C über Zeitdauern von etwas mehr als 30 min gemessen, wobei sowohl die Temperaturen als auch die Zeiten als abhängig von der Menge des brennbaren Materials charakterisiert werden (Molina und Llinares, 2001). Nach Bränden in Pinienwäldern Nordamerikas auf vulkanischen Böden wurden in 10 cm Tiefe bis zu 13 Stunden nach Abklingen der Feuer noch Temperaturen von mehr als 100°C gemessen (Smith et al., 2016).

Die oben zitierte Arbeit des DFNK liefert bezüglich der Dauer von Brandereignissen nur begrenzt verwertbare Daten, weil die gezeigten Abbildungen insgesamt nur 10 Minuten des Brandverlaufs umfassen. Es lässt sich aber Folgendes feststellen: Die o.g. maximalen Temperaturen währten nur wenige Minuten. Bei dem 420°C Ereignis kühlte sich die Bodenoberfläche in 7 Minuten auf < 50°C ab, bei dem 700°C Ereignis wurden hingegen nach 7 Minuten immer noch Werte von rund 180°C gemessen.

Insgesamt lässt sich anhand der zitierten Arbeiten zwar resümieren, dass die Spitzen bei den Temperaturen nur kurze Zeit anhalten und somit bei längeren Brandereignissen eher niedrigere Temperaturen wirken, jedoch ist eine strikte Trennung zwischen „heißen“ und „kalten“ Bränden nach den Erfahrungen in einheimischen Wäldern nicht möglich. Dies liegt daran, dass Schwelbrände einerseits nach mehreren Tagen des Schwelens nochmals zu offenen Feuern aufflammen können (Timm, 2019) und dass andererseits auch bei Schwelbränden über mehrere Tage Temperaturen von mehr als 400°C gemessen worden sind (Wolters, 2019). Insgesamt lässt sich im Hinblick auf die Eingabeparameter dennoch ein Zusammenhang ableiten, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist.

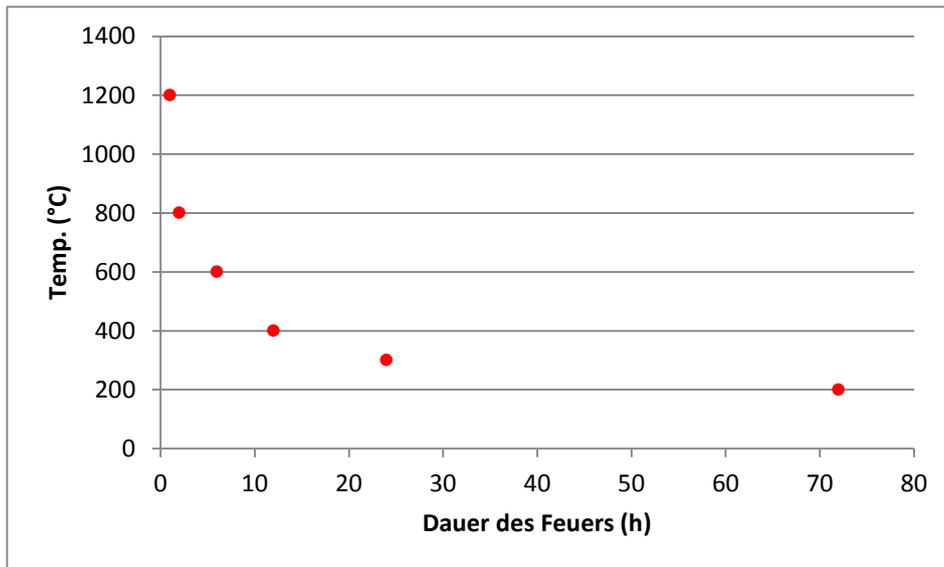


Abbildung 1: Möglicher Zusammenhang zwischen der mittleren Brandtemperatur und der Dauer eines Brandereignisses bei Waldbränden. Da hier kein konkreter Verlauf für ein bestimmtes Ereignis dargestellt ist, sind die Punkte nicht miteinander verbunden.

3. Herleitung der relevanten Gleichungen zur Berechnung der eindimensionalen vertikalen Wärmeausbreitung in Böden bei einem Brand an der Bodenoberfläche

Eine gute Einführung in den Wärmetransport in Böden ist in Kapitel 8 in Campbell und Norman (1998) und in Kapitel 12 in Hillel (1998) zu finden.

Die Ausbreitung von Wärme in einem Boden (oder einem Festkörper im Allgemeinen) wird mit der Wärmetransportgleichung beschrieben. In eindimensionaler Form lautet sie:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [1]$$

T = Temperatur

t = Zeit

D_{th} = thermische Diffusivität

z = Entfernung in eine Richtung z

Diese Gleichung kann man unter bestimmten Bedingungen analytisch lösen, nämlich dann, wenn D_{th} und die Anfangstemperatur überall im Boden gleich sind, und wenn der Verlauf der Temperatur an der Bodenoberfläche mit der Zeit mit einer eindeutigen mathematischen Beziehung beschrieben werden kann. Die Lösung sieht für jede Beziehung etwas anders aus. All das schränkt die Verwendung einer analytischen Lösung stark ein. (Analytisch bedeutet, dass man $T(z,t)$, also die Temperatur T an einer Stelle z zu einer Zeit t, direkt (ohne Iteration) ausrechnen kann.

Die Alternative ist eine numerische Lösung mit finiten Differenzen, für die unterschiedliche D_{th} -Werte und Anfangstemperaturen in verschiedenen Bereichen eines Bodenprofils verwendet werden können und für die der Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche jede beliebige Form annehmen kann. Die o.g. Einschränkungen bestehen für eine numerische Lösung also nicht. Wir haben uns daher für den numerischen Weg entschieden, da er flexibler in Bezug auf die möglichen Rand- und Anfangsbedingungen ist. Letztere werden in Kapitel 4 näher betrachtet.

Für eine numerische Berechnung wird das zu betrachtende Bodenprofil zunächst in Segmente unterteilt (Abbildung 2). In Bereichen wo große und/oder schnelle Temperaturänderungen zu erwarten sind, sollte die Dicke der Segmente kleiner gewählt werden, um eine bessere räumliche Auflösung zu erhalten. Bei Wärmeausbreitung in Böden ist das immer nahe der Oberfläche. Weiter unten im Bodenprofil können die Segmente dicker werden. Das ist in Abbildung 2 angedeutet und wird später in der Programmbeschreibung spezifiziert. In die Mitte jedes Segments wird ein Punkt gesetzt, dem die thermischen Eigenschaften des Segments zugeordnet werden. (Mehr dazu später.) Jedes Segment erhält einen Index i. Die Segmente $i = 1$ bis $i = n$ sind die so genannten inneren Segmente, für die der Verlauf der Temperatur mit der Zeit als Folge eines Eintrags von Wärme von der

Bodenoberfläche (hier durch einen Brand) berechnet wird. Der Punkt bzw. das Segment $i = 0$ bildet den oberen, der Punkt bzw. das Segment $i = n+1$ den unteren Rand der zu betrachtenden Bodensäule.

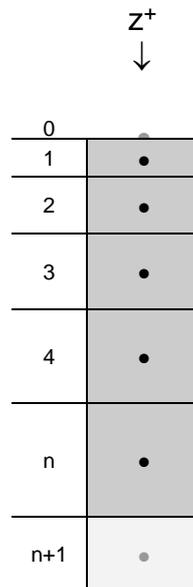


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines in Segmente aufgeteilten Bodenprofils. Die Segmente 1 bis n sind so genannte innere Segmente, das Segment 0 bildet den oberen Rand und das Segment n+1 den unteren Rand. Die Punkte kennzeichnen die Mitte eines Segments. Ihnen werden die thermischen Eigenschaften eines Segmentes zugeordnet. Die Dicke des Segments 0 ist hier Null, so dass der Segmentmittelpunkt auf der Oberfläche sitzt. z^+ = positive z-Richtung. Für weitere Erläuterungen siehe Text.

Der Startpunkt für die Herleitung der Gleichungen zur numerischen Berechnung des Wärmetransports ist die Wärmebilanzgleichung für ein beliebiges Segment. Sie lautet:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = H_{\text{rein}} - H_{\text{raus}} \quad [2]$$

ΔW = Änderung der im Element als Wärme gespeicherten Energie [J]

Δt = Zeitraum, über den sich ΔW vollzieht [s]

H_{rein} = Wärmefluss in das Element hinein [J/s]

H_{raus} = Wärmefluss aus dem Element heraus [J/s]

Für die im Element als Wärme gespeicherte Energie W gilt:

$$W = \rho c \cdot V \cdot T \quad [3]$$

ρc = volumetrische spezifische Wärme des Bodens [J/cm³/°C]

V = Volumen des Segments [cm³]

T = Temperatur des Segments [°C]

Der Parameter ρc gibt an, wie viel Energie benötigt wird, um die Temperatur T in einem Volumen von $V = 1 \text{ cm}^3$ um 1°C zu erhöhen. Die Temperatur T ist ein Maß für die in einem Volumen V als Wärme gespeicherte Energiemenge.

Das Volumen eines Segments berechnet sich als:

$$V = dx \cdot dy \cdot dz \quad [4]$$

dx = Ausdehnung des Segments in x-Richtung [cm]

dy = Ausdehnung des Segments in y-Richtung [cm]

dz = Ausdehnung des Segments in z-Richtung [cm]

Die z-Richtung wird hier als die vertikale Richtung in den Boden hinein definiert. Man beachte, dass für Wärmefluß senkrecht in den Boden hinein dx und dy für alle Segmente gleich sind.

Für den Wärmefluss gilt ganz allgemein:

$$H = k_{th} \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad [5]$$

k_{th} = thermische Leitfähigkeit des Bodens [J/s/cm/ $^\circ\text{C}$]

A = Fließquerschnitt [cm 2]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten im Boden [$^\circ\text{C}$]

ΔL = Distanz zwischen diesen zwei Punkten [cm]

Bei Wärmefluß senkrecht in den Boden hinein gilt für alle Segmente:

$$A = dx \cdot dy \quad [6]$$

Betrachtet man nun ein konkretes Segment, z.B. Segment 3, und setzt [3] bis [6] mit den entsprechenden Indizes in [2] ein, erhält man:

$$\rho c_3 \cdot dx \cdot dy \cdot dz_3 \cdot \frac{\Delta T_3}{\Delta t} = k_{th23} \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{T_2 - T_3}{\Delta L_{23}} - k_{th34} \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{T_3 - T_4}{\Delta L_{34}} \quad [7]$$

ΔT_3 = Änderung der Temperatur in Segment 3 über den Zeitraum Δt [$^\circ\text{C}$]

k_{th23} = thermische Leitfähigkeit in das Segment 3 hinein, also von Punkt 2 nach 3 [J/s/cm/ $^\circ\text{C}$]

k_{th34} = thermische Leitfähigkeit aus dem Segment 3 heraus, also von Punkt 3 nach 4 [J/s/cm/ $^\circ\text{C}$]

ΔL_{23} = Distanz zwischen Punkt 2 und 3 [cm]

ΔL_{34} = Distanz zwischen Punkt 3 und 4 [cm]

Die Variablen dx und dy erhielten keinen Index, weil sie in allen Segmenten den gleichen Wert haben. Teilt man nun beide Seiten durch $\rho c \cdot dx \cdot dy \cdot dz_3$, vereinfacht sich [7] zu:

$$\frac{\Delta T_3}{\Delta t} = \frac{k_{th23}}{\rho c_3} \cdot \frac{T_2 - T_3}{dz_3 \cdot \Delta L_{23}} - \frac{k_{th34}}{\rho c_3} \cdot \frac{T_3 - T_4}{dz_3 \cdot \Delta L_{34}} \quad [8]$$

Die verschiedenen ΔL erhält man wie am Beispiel für ΔL_{23} dargelegt:

$$\Delta L_{23} = \frac{dz_2}{2} + \frac{dz_3}{2} = \frac{dz_2 + dz_3}{2} \quad [9]$$

An dieser Stelle ist es sinnvoll einen neuen Parameter einzuführen, nämlich die thermische Diffusivität, die wie folgt definiert ist:

$$D_{th23} = \frac{k_{th23}}{\rho c_3} \quad [10a]$$

$$D_{th34} = \frac{k_{th34}}{\rho c_3} \quad [10b]$$

D_{th23} = thermische Diffusivität in das Segment 3 hinein, also von Punkt 2 nach 3 [cm^2/s]

D_{th34} = thermische Diffusivität aus dem Segment 3 heraus, also von Punkt 3 nach 4 [cm^2/s]

Mit [10a und b] wird aus [8]:

$$\frac{\Delta T_3}{\Delta t} = D_{th23} \cdot \frac{T_2 - T_3}{dz_3 \cdot \Delta L_{23}} - D_{th34} \cdot \frac{T_3 - T_4}{dz_3 \cdot \Delta L_{34}} \quad [11]$$

Diese Gleichung bringt zum Ausdruck, dass für den Wärmetransport nicht die thermische Leitfähigkeit an sich, sondern die thermische Diffusivität entscheidend ist, die das Verhältnis von thermischer Leitfähigkeit (k_{th}) zu volumetrischer spezifischer Wärme (ρc) des Bodens ist ([10a,b]). Man muss sich also nicht näher mit k_{th} oder ρc befassen, sondern nur mit D_{th} , was in Kapitel 4.1 geschieht.

Schiebt man Δt auf die rechte Seite von [11] und sammelt die Variablen etwas anders, erhält man:

$$\Delta T_3 = \frac{D_{th23} \cdot \Delta t}{dz_3 \cdot \Delta L_{23}} \cdot (T_2 - T_3) - \frac{D_{th34} \cdot \Delta t}{dz_3 \cdot \Delta L_{34}} \cdot (T_3 - T_4) \quad [12]$$

Der besseren Übersicht halber kann man die beiden Brüche wie folgt definieren:

$$\lambda_{in_3} = \frac{D_{th23} \cdot \Delta t}{dz_3 \cdot \Delta L_{23}} \quad [13a]$$

$$\lambda_{out_3} = \frac{D_{th34} \cdot \Delta t}{dz_3 \cdot \Delta L_{34}} \quad [13b]$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein Index wie z.B. 23, der bedeuten soll „von 2 nach 3“, in einem Computerprogramm nicht umgesetzt werden kann. Man muss daher den

Index des Start- oder Zielsegments verwenden. Wir geben den Variablen D_{th} und ΔL im Programm den Index des Zielsegments.

Der Gebrauch von [13a und b] vereinfacht [12] zu:

$$\Delta T_3 = \lambda_{in_3} \cdot (T_2 - T_3) - \lambda_{out_3} \cdot (T_3 - T_4) \quad [14]$$

Nun muss ein Zeitindex t eingeführt werden. Man erinnere sich (vgl. [7]), dass das ΔT auf linken Seite von [14] für die Änderung der Temperatur in Segment 3 über den Zeitraum Δt steht. Das bedeutet:

$$\Delta T_3 = T_3^{t+\Delta t} - T_3^t \quad [15]$$

$T_3^{t+\Delta t}$ = Temperatur im Segment 3 zu Zeitpunkt $t+\Delta t$, also in der Zukunft [°C]

T_3^t = Temperatur im Segment 3 zu Zeitpunkt t , also jetzt [°C]

Setzt man nun [15] in [14] ein und versieht gleichzeitig die T 's auf der rechten Seite mit dem Zeitindex t erhält man:

$$T_3^{t+\Delta t} - T_3^t = \lambda_{in_3} \cdot (T_2^t - T_3^t) - \lambda_{out_3} \cdot (T_3^t - T_4^t) \quad [16]$$

Die λ 's erhalten keinen Zeitindex, da hier davon ausgegangen wird, dass sie sich während eines Brandereignisses nicht ändern. Dazu werden in Kapitel 4.1 noch weitere Aussagen gemacht.

Als nächstes wird nun T_3^t auf die rechte Seite gerückt:

$$T_3^{t+\Delta t} = \lambda_{in_3} \cdot (T_2^t - T_3^t) - \lambda_{out_3} \cdot (T_3^t - T_4^t) + T_3^t \quad [17]$$

Das Ausmultiplizieren der Klammern ergibt:

$$T_3^{t+\Delta t} = \lambda_{in_3} \cdot T_2^t - \lambda_{in_3} \cdot T_3^t - \lambda_{out_3} \cdot T_3^t + \lambda_{out_3} \cdot T_4^t + T_3^t \quad [18]$$

Daraus folgt nach einer Umstellung:

$$T_3^{t+\Delta t} = \lambda_{in_3} \cdot T_2^t - (\lambda_{in_3} + \lambda_{out_3} - 1) \cdot T_3^t + \lambda_{out_3} \cdot T_4^t \quad [19]$$

Wir haben die o.g. Gleichungen für die Wärmebilanz eines konkreten Segments hergeleitet ($i = 3$), weil die allgemeine Schreibweise mit i -Indizes sehr verwirrend sein kann, wenn man damit nie oder nur selten zu tun hat. Mit solchen Indizes wird aus [19] die so genannte explizite Lösung der Wärmetransportgleichung mit finiten Differenzen:

$$T_i^{t+\Delta t} = \lambda_{in_i} \cdot T_{i-1}^t - (\lambda_{in_i} + \lambda_{out_i} - 1) \cdot T_i^t + \lambda_{out_i} \cdot T_{i+1}^t \quad [20]$$

Explizite Lösung bedeutet, dass man mit Gleichung [20] nun die neue Temperatur in einem Segment ($T_i^{t+\Delta t}$) direkt aus seiner alten Temperatur (T_i^t), der alten Temperatur des darüber

(T_{i-1}^t) und darunter liegenden Segments (T_{i+1}^t) sowie der thermischen Diffusivität in das Element hinein (λ_i) und aus dem Element heraus (λ_{i+1}) berechnen kann. Voraussetzung dafür ist, dass man zu Beginn der Berechnungen, also zum Zeitpunkt $t = 0$, die Temperaturen in den inneren Segmenten $i = 1$ bis $i = n$ sowie die λ 's zwischen allen Segmenten kennt, ebenso wie die Temperatur im Segment $i = 0$, das den oberen Rand des zu betrachtenden Bodenprofils bildet, und im Segment $i = n+1$, das den unteren Rand bildet. Darauf wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Wichtig ist, dass man mit [20] nur dann eine gültige Lösung erhält, wenn alle λ 's < 0.5 sind, also:

$$\lambda = \frac{D_{th} \cdot \Delta t}{dz \cdot \Delta L} < 0,5 \quad [21]$$

Der eben vorgestellte Lösungsweg wurde in einem Computerprogramm umgesetzt. Dieses Programm wird in Kapitel 5 genau beschrieben.

Es sei noch angemerkt, dass die explizite numerische Lösung der Wärmetransportgleichung nur selten verwendet wird, weil sie unter Umständen instabil ist (vgl. [21]) und man sehr kurze Zeitschritte für die Berechnungen braucht (hier 5 s), um eine genaue Lösung zu erhalten. Das führt zu relativ langen Rechenzeiten. Mit den hier verwendeten Werten für D_{th} , Δt , dz und ΔL (vgl. Kapitel 5) wird die Bedingung [21] immer eingehalten, es gibt also immer eine stabile Lösung. Die kurzen Zeitschritte sind hier auch kein Problem, da die Berechnungen meist in < 1 s abgeschlossen sind. Der große Vorteil der expliziten Lösung ist, dass sie gut verständlich ist.

Auf Wunsch können wir auch ein Computerprogramm mit der mathematisch versierteren Crank-Nicholson Lösung zur Verfügung stellen. Damit gibt es keine Stabilitätsprobleme und man kann längere Zeitschritte verwenden. Wie aber gerade ausgeführt, ist die explizite Lösung mit den hier verwendeten Eingabeparametern auch immer stabil, und bei einer Rechenzeit von < 1 s ist eine noch kürzere Rechenzeit in der Praxis bedeutungslos.

4. Anfangs- und Randbedingungen

4.1 Anfangsbedingungen

Temperatur im Boden

Zu Beginn der Berechnungen, also für den Zeitpunkt $t = 0$, muss für jeden Punkt von $i = 1$ bis $i = n$ eine Temperatur angegeben werden und auch eine thermische Diffusivität, auf die später eingegangen wird. Das sind die so genannten Anfangsbedingungen.

Im Sommer liegen die Bodentemperaturen oft zwischen 30°C an der Bodenoberfläche und 10°C einige Meter darunter. Die Temperatur an der Bodenoberfläche folgt dem Tagesverlauf der Lufttemperatur. Das bedeutet, es gibt ein Minimum am frühen Morgen, gefolgt von einem Anstieg zu einem Temperaturmaximum am frühen Nachmittag auf das dann ein Rückgang zum morgendlichen Minimum folgt. Dieser Tagesgang ist auch tiefer im Bodenprofil zu finden, aber die Amplitude, d.h. die Differenz zwischen dem Temperaturminimum und -maximum, wird mit zunehmender Tiefe geringer. Außerdem gibt es eine Zeitverschiebung: Je tiefer im Boden man ist, desto später treten das Minimum und Maximum auf. Zu bestimmten Tageszeiten kann sich die Höchsttemperatur daher in einigen cm Tiefe anstatt an der Oberfläche befinden. Die Temperatur der Bodenoberfläche hängt auch noch davon ab, ob sie Sonnenstrahlung ausgesetzt ist.

In einigen Metern Tiefe ändert sich die Bodentemperatur praktisch nicht, weder im Verlauf eines Tages, noch eines Jahres. Die Temperatur dort entspricht dem Jahresmittel der Lufttemperatur.

In der Regel wird man an einen Standort, wo ein Feuer ausgebrochen ist, die Verteilung der Bodentemperatur zu diesem Zeitpunkt nicht kennen. Man muss sie also schätzen. Wie wir gleich zeigen werden, haben die Anfangstemperaturen im Bodenprofil keinen besonders großen Einfluss auf die Höhe der Temperaturen, die dort letztlich von einem Feuer hervorgerufen werden.

Tabelle 1 zeigt die Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen eines Bodenprofils (Spalte 1), nachdem an der Bodenoberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde gebrannt hat. In Spalte 2 ist das berechnete Temperaturprofil aufgeführt, wenn die Temperatur im Boden vor dem Feuer überall 10°C betrug. Spalte 3 gibt dies für 20°C an. Die Werte in Spalte 4 basieren auf den in Spalte 5 dargestellten Anfangstemperaturen, die von 30°C im ersten Bodensegment auf 10°C in 210 cm Tiefe zurückgehen.

Eine durchgängig gleiche Bodentemperatur ist in der Natur unwahrscheinlich. Im Sommer sind 10°C außerdem zu niedrig. 20°C dagegen ist oben eventuell etwas zu niedrig, aber unten zu hoch. Ein Verlauf wie in Spalte 5 kann in der Natur so vorkommen. Man würde also zunächst dafür plädieren, die Anfangstemperaturen so oder so ähnlich anzugeben. Das ist

übrigens nur mit der hier vorgestellten numerischen Lösung möglich, die analytische setzt die gleiche Temperatur in allen Segmenten voraus.

Tabelle 1: Berechnete Temperatur in verschiedenen Bodentiefen (Spalte 1) bei unterschiedlichen Anfangstemperaturen (T_{anf}), nachdem an der Bodenoberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde gebrannt hat. $D_{th} = 0,004 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Bodentiefe [cm]	$T_{anf} = 10 \text{ °C}$	$T_{anf} = 20 \text{ °C}$	T_{anf} wie in Spalte 5	$T_{anf} \text{ [°C]}$ für Spalte 4
0,0	400,0	400,0	400,0	30,0
0,5	371,1	371,8	372,3	29,3
1,5	314,2	316,4	317,7	28,6
2,5	260,2	263,8	265,9	27,9
3,5	210,6	215,5	218,4	27,2
5,0	144,8	151,3	155,1	26,6
7,0	83,4	91,5	95,9	25,9
9,0	46,0	55,1	59,5	25,2
11,0	26,0	35,5	39,7	24,5
13,0	16,4	26,2	30,0	23,8
15,0	12,4	22,3	25,5	23,1
17,0	10,8	20,8	23,4	22,4
19,0	10,3	20,3	22,3	21,7
22,5	10,0	20,0	21,3	21,0
27,5	10,0	20,0	20,4	20,3
32,5	10,0	20,0	19,7	19,7
37,5	10,0	20,0	19,0	19,0
42,5	10,0	20,0	18,3	18,3
47,5	10,0	20,0	17,7	17,6
55,0	10,0	20,0	16,9	16,9
65,0	10,0	20,0	16,2	16,2
75,0	10,0	20,0	15,5	15,5
85,0	10,0	20,0	14,8	14,8
95,0	10,0	20,0	14,2	14,1
110,0	10,0	20,0	13,5	13,4
130,0	10,0	20,0	12,8	12,8
150,0	10,0	20,0	12,1	12,1
170,0	10,0	20,0	11,4	11,4
190,0	10,0	20,0	10,7	10,7
210,0	10,0	20,0	10,0	10,0

Wie man in der Tabelle sieht, beträgt im Beispiel mit der im Sommer unrealistischen Anfangstemperatur von 10°C (Spalte 2) der größte Temperaturunterschied im Vergleich zu den Werten mit realistischeren unterschiedlichen Anfangswerten in jedem Segment 13,7°C in 11 cm Tiefe (Spalte 4). In Richtung Bodenoberfläche, wo das Feuer bereits deutlichere Temperaturerhöhungen hervorgerufen hat, sind die Unterschiede geringer und nehmen mit größerer Temperaturerhöhung ab. Im Beispiel mit 20°C Anfangstemperatur (Spalte 3) beträgt der größte Unterschied zu Spalte 4 nur 4,4°C in 7 und 9 cm Tiefe, wenn man die tieferen Bereiche des Bodenprofils, wo sich der Brand nicht auswirkt, außer Acht lässt.

Tabelle 2 zeigt die entsprechenden Daten nach 12 Stunden Brand. Durch einen Vergleich mit Tabelle 1 kann man erkennen, dass die Unterschiede in der für ein Segment berechneten Temperatur mit zunehmender Dauer des Feuers, die mit einer größeren Temperaturerhöhung einhergeht, ebenfalls abnehmen. Die maximale Differenz zwischen Spalte 2 und 4 ist nur noch 9,2°C in 32,5 cm Tiefe, die zwischen Spalte 3 und 4 nur noch 1,2°C in 15 cm Tiefe, wenn man die tieferen Bereiche des Bodenprofils, wo sich der Brand nicht auswirkt, erneut außer Acht lässt.

Nun ist zu beachten, dass sich die Temperaturen in Tabelle 1 und 2 in den oberen Segmenten über wenige cm erheblich ändern. Selbst wenn sich die Temperaturen in der gleichen Tiefe zwischen den Spalten deutlich unterscheiden, sind die Temperaturprofile deshalb nur sehr wenig gegeneinander verschoben. Das wird in Abbildung 3 und 4 deutlich, wo die Daten aus den Tabellen grafisch dargestellt sind. Man sieht fast keinen Unterschied im Temperaturverlauf in den Segmenten, in denen noch ein deutlicher Einfluss des Feuers zu sehen ist.

In dieser Arbeit geht es letztlich um die Frage, in welcher Tiefe eine bestimmte kritische Temperatur erreicht wird, z.B. 200, 100 oder 50°C. Mit allen drei Anfangsbedingungen erhält man dafür nach 1 h (Tabelle 1 und Abbildung 3) die gleiche bzw. eine sehr ähnliche Antwort: Die 200°C Linie ist in allen drei Fällen zwischen 3,5 und 5 cm Tiefe, die 100°C Linie zwischen 5 und 7 cm. Bei 10°C Anfangstemperatur liegt die 50°C Linie zwischen 7 und 9 cm, bei den beiden andern zwischen 9 und 11 cm, also 2 cm tiefer. Letzteres ist kein erheblicher Unterschied. Nach 12 h (Tabelle 2 und Abbildung 4) sind diese Linien tiefer im Bodenprofil zu finden, aber ansonsten ist das Bild ähnlich: Für konstante 20°C (Spalte 3) und eine mit der Tiefe abnehmende Anfangstemperatur (Spalte 4) liegen sie auf dem gleichen Niveau, für 10°C wenige cm darüber.

Diese Ausführungen belegen, dass die gewählte Anfangstemperatur im Boden keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Ein einheitlicher Wert für alle Segmente ist ausreichend. Für die Sommermonate, in denen Brände üblicherweise auftreten, sind 20°C ein geeigneter Wert, ansonsten kann man die mittlere Lufttemperatur im Betrachtungszeitraum verwenden. Es spricht aber auch nichts dagegen, einen

Temperaturgradienten im Bodenprofil zu verwenden, den man allerdings auch nur schätzen kann.

Tabelle 2: Berechnete Temperatur in verschiedenen Bodentiefen (Spalte 1) bei unterschiedlichen Anfangstemperaturen (T_{anf}), nachdem an der Bodenoberfläche ein Feuer mit 400°C für 12 Stunden gebrannt hat. $D_{th} = 0,004 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Bodentiefe [cm]	$T_{anf} = 10 \text{ °C}$	$T_{anf} = 20 \text{ °C}$	T_{anf} wie in Spalte 5	$T_{anf} [\text{°C}]$ für Spalte 4
0,0	400,0	400,0	400,0	30,0
0,5	391,6	391,9	391,9	29,3
1,5	375,0	375,6	375,7	28,6
2,5	358,3	359,4	359,6	27,9
3,5	341,8	343,3	343,6	27,2
5,0	317,4	319,5	319,8	26,6
7,0	285,6	288,6	289,0	25,9
9,0	255,2	258,9	259,4	25,2
11,0	226,3	230,7	231,3	24,5
13,0	199,2	204,3	205,0	23,8
15,0	174,0	179,8	180,5	23,1
17,0	151,0	157,4	158,0	22,4
19,0	130,1	137,0	137,6	21,7
22,5	97,3	105,1	105,6	21,0
27,5	63,7	72,3	72,5	20,3
32,5	41,1	50,3	50,0	19,7
37,5	27,1	36,6	35,8	19,0
42,5	18,9	28,7	27,3	18,3
47,5	14,5	24,4	22,4	17,6
55,0	11,3	21,2	18,5	16,9
65,0	10,2	20,2	16,6	16,2
75,0	10,0	20,0	15,6	15,5
85,0	10,0	20,0	14,9	14,8
95,0	10,0	20,0	14,3	14,1
110,0	10,0	20,0	13,6	13,4
130,0	10,0	20,0	12,8	12,8
150,0	10,0	20,0	12,1	12,1
170,0	10,0	20,0	11,4	11,4
190,0	10,0	20,0	10,7	10,7
210,0	10,0	20,0	10,0	10,0

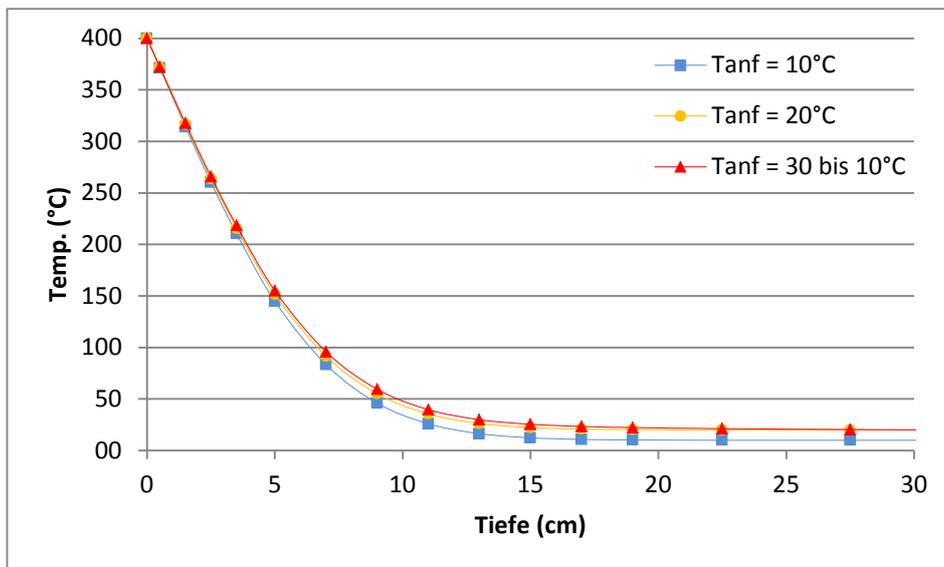


Abbildung 3: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil mit $D_{th} = 0,004 \text{ cm}^2/\text{s}$ bei unterschiedlichen Anfangstemperaturen (T_{anf}), nachdem an der Oberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde gebrannt hat. Die Verteilung der Anfangstemperaturen für den Fall $T_{anf} = 30 \text{ bis } 10^\circ\text{C}$ ist in Spalte 5 in Tabelle 1 oder 2 angegeben.

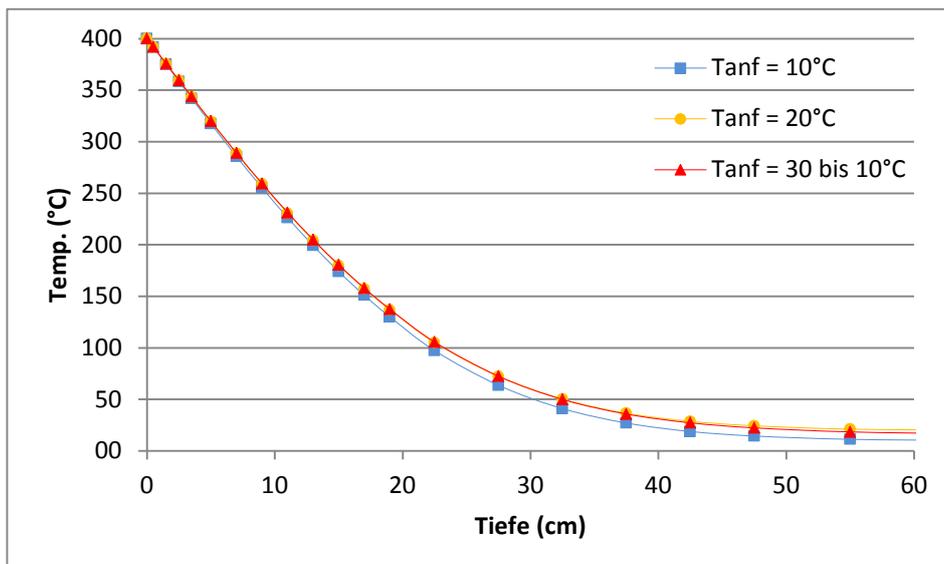


Abbildung 4: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil mit $D_{th} = 0,004 \text{ cm}^2/\text{s}$ bei unterschiedlichen Anfangstemperaturen (T_{anf}), nachdem an der Oberfläche ein Feuer mit 400°C für 12 Stunden gebrannt hat. Die Verteilung der Anfangstemperaturen für den Fall $T_{anf} = 30 \text{ bis } 10^\circ\text{C}$ ist in Spalte 5 in Tabelle 1 oder 2 angegeben. Man beachte, dass hier die Skala der x-Achse anders ist als in Abbildung 3

Anmerkung zu diesen und folgenden vergleichbaren Abbildungen:

Die Temperatur ist in den Berechnungen hier eine Funktion der Tiefe. Sie ist somit die abhängige Variable und daher auf der y-Achse abgetragen, was die mathematisch richtige Darstellung ist. Wenn man die Tiefe auf der y-Achse haben möchte, was bildlich sinnvoll ist, da die Tiefe in die vertikale Richtung geht, braucht man die Abbildungen nur um 90 Grad im Uhrzeigersinn zu drehen.

Nun ist noch zu berücksichtigen, dass man wohl nie die genaue Temperatur an der Bodenoberfläche bei einem in der Natur auftretenden Feuer kennen wird. Ein geschätzter Wert von 400°C kann leicht um einige 10°C darüber oder darunter liegen. Außerdem gibt es eine gewisse Unsicherheit bei den D_{th} -Werten, die gleich besprochen werden. Beides wirkt sich auf die berechneten Bodentemperaturen aus, so dass es zu Verschiebungen des Temperaturniveaus, z.B. der Tiefe der 200°C Linie, kommen kann. Auch das spricht dafür, dass es ausreicht, in allen Bodensegmenten die gleiche Anfangstemperatur von z.B. 20°C anzusetzen, um die Auswirkungen eines Feuers auf die Bodentemperaturen zu untersuchen.

Thermische Diffusivität (D_{th})

Abbildung 5 zeigt D_{th} für verschiedene Bodenarten in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Für organische Böden ist D_{th} im Wesentlichen konstant bei 0,0014 cm²/s. Bei Tonböden steigt der Wert zwischen 10 und 20%-Vol. Wassergehalt stark an und bleibt danach ebenfalls konstant bei 0,0033 cm²/s. Nun kommen in Tonböden in der Natur Wassergehalte < 20%-Vol. praktisch nicht vor (Ad-hoc-AG Boden, 2005), so dass man auch hier einen konstanten Wert ansetzen kann. Ähnlich ist der Fall bei Lehm Böden. Hier steigt D_{th} zwischen 5 und 15%-Vol. Wassergehalt stark an und bleibt danach bei rund 0,004 cm²/s. Wassergehalte < 15%-Vol. sind bei Lehm Böden in der Natur ebenfalls selten (Ad-hoc-AG Boden, 2005), so dass man bei dieser Bodenart wiederum ein gleich bleibendes D_{th} verwenden kann. Für diese drei Bodenarten ist es daher nicht nötig, verschiedene D_{th} -Werte für die einzelnen Segmente eines Bodenprofils einzusetzen.

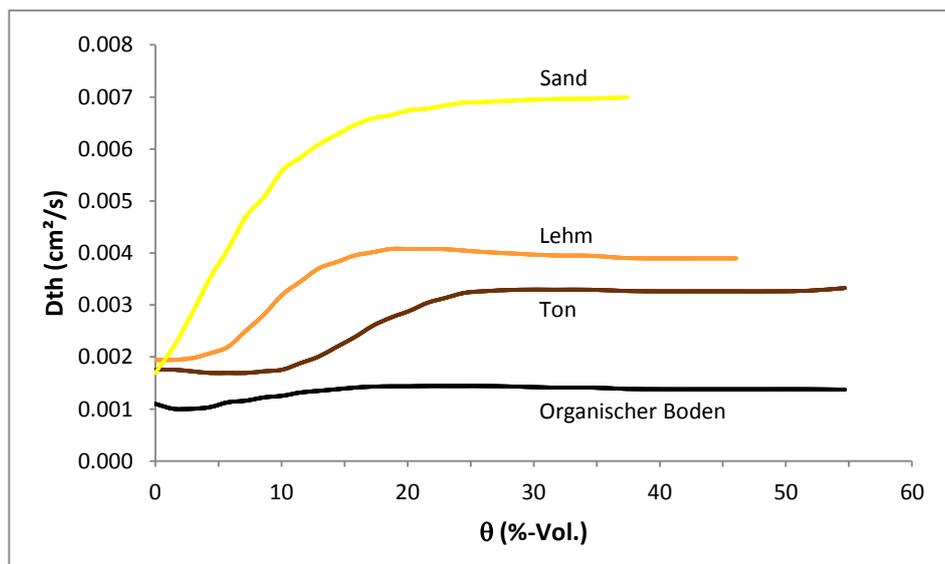


Abbildung 5: Thermische Diffusivität (D_{th}) verschiedener Bodenarten in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt (θ) nach Campbell und Norman (1998).

Bei Sandböden ist die Situation anders. Hier sind Wassergehalte $> 15\%$ -Vol. eher die Ausnahme, so dass der maximale Wert von $D_{th} = 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$ nur selten vorkommt. Alle Wassergehalte von 2 bis 15% können jedoch auftreten, so dass für Sandböden Werte von $D_{th} = 0,002$ bis $0,0064 \text{ cm}^2/\text{s}$ möglich sind. Man braucht also unter Umständen verschiedene Werte für das D_{th} zwischen den einzelnen Segmenten. Mit einer analytischen Lösung der Wärmetransportgleichung ist das nicht möglich, wohl aber mit der hier vorgestellten numerischen.

Für verschiedene D_{th} -Werte in den einzelnen Segmenten gibt es noch zwei andere Gründe: In Waldböden gibt es typischerweise eine mehrere cm dicke Humusauflage. Wie gerade dargestellt, ist für organische Böden $D_{th} = 0,0014 \text{ cm}^2/\text{s}$, für den darunter liegenden mineralischen Boden, je nach Textur, mit $D_{th} = 0,0033$ bis maximal $0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$ aber deutlich höher. Die Humusauflage reduziert daher den Wärmeeintrag. Erschwerend kommt hinzu, dass die Humusauflage im Lauf eines Feuers teilweise oder sogar ganz verbrennen kann (Wieting et al., 2017).

Man kann die Wirkung einer Humusschicht bzw. ihres Verschwindens abschätzen, indem man die Temperaturverteilung im Bodenprofil mit und ohne Humusauflage berechnet. Der Effekt eines Brandes auf die Bodentemperaturen liegt dann irgendwo dazwischen. Das ist in Abbildung 6 und Tabelle 3 für eine 6 cm dicke Humusauflage ($D_{th} = 0,0014 \text{ cm}^2/\text{s}$) über einem Sand mit 10%-Vol. Wassergehalt ($D_{th} = 0,0056 \text{ cm}^2/\text{s}$) illustriert.

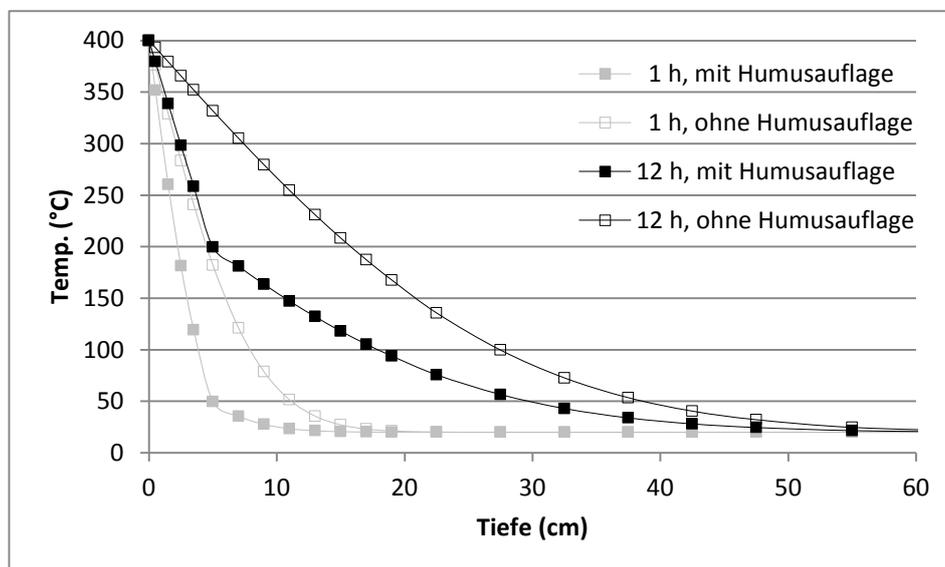


Abbildung 6: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil mit 6 cm Humusauflage ($D_{th} = 0,0014 \text{ cm}^2/\text{s}$ in den obersten 6 cm und $D_{th} = 0,0056 \text{ cm}^2/\text{s}$ darunter) und ohne ($D_{th} = 0,0056 \text{ cm}^2/\text{s}$ im gesamten Profil), nachdem an der Oberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde bzw. 12 Stunden gebrannt hat. Anfangstemperatur in allen Bodensegmenten = 20°C .

Tabelle 3: Temperatur in verschiedenen Tiefen eines Sandbodens (Spalte 1) mit (Spalte 2 und 4) und ohne eine 6 cm dicke Humusauflage (Spalte 3 und 5), nachdem an der Bodenoberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde (Spalte 2 und 3) bzw. 12 Stunden (Spalte 4 und 5) gebrannt hat. $D_{th-Humus} = 0,0014 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_{th-Sand} = 0,0056 \text{ cm}^2/\text{s}$. Anfangstemperatur in allen Bodensegmenten = 20°C.

Bodentiefe [cm]	1 Stunde mit Humus	1 Stunde ohne Humus	12 Stunden mit Humus	12 Stunden ohne Humus
0,0	400,0	400,0	400	400,0
0,5	351,8	376,1	379,5	393.1
1,5	260,2	329,0	338,8	379.4
2,5	181,3	283,5	298,3	365.7
3,5	119,2	240,8	258,4	352.0
5,0	49,8	182,0	199,6	331.7
7,0	35,6	121,2	181,0	305.2
9,0	27,6	78,6	163,5	279.4
11,0	23,4	51,4	147,2	254.6
13,0	21,4	35,6	132,1	230.9
15,0	20,6	27,2	118,1	208.4
17,0	20,2	23,1	105,4	187.3
19,0	20,1	21,3	93,9	167.6
22,5	20,0	20,2	75,7	135.7
27,5	20,0	20,0	56,6	99.7
32,5	20,0	20,0	43,0	72.7
37,5	20,0	20,0	33,9	53.5
42,5	20,0	20,0	28,1	40.5
47,5	20,0	20,0	24,6	32.2
55,0	20,0	20,0	21,6	24,7
65,0	20,0	20,0	20,4	21,3
75,0	20,0	20,0	20,1	20,3
85,0	20,0	20,0	20,0	20,1
95,0	20,0	20,0	20,0	20,0
110,0	20,0	20,0	20,0	20,0
130,0	20,0	20,0	20,0	20,0
150,0	20,0	20,0	20,0	20,0
170,0	20,0	20,0	20,0	20,0
190,0	20,0	20,0	20,0	20,0
210,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Mit dieser Auflage dringt die Wärme nicht so weit in den Boden ein und die Temperaturen sind geringer. Nach 1 h erreichen die 200, 100 und 50°C Linie mit Auflage etwa 2, 4 und 5 cm Tiefe (Spalte 2), ohne Humusaufgabe dagegen 4,5, 8 und 11 cm (Spalte 3). Nach 12 h sind es 5, 18 und 30 cm mit Humus (Spalte 4), bzw. 16, 27,5 und 39 cm ohne Humus (Spalte 5). Die Differenzen in der Eindringtiefe mit und ohne Humusaufgabe sind in allen Fällen < 10 cm und damit nicht besonders groß aber dennoch klar zu sehen. Die Unterschiede in der Temperatur in gleicher Tiefe fallen da deutlicher aus. Die maximale Temperaturdifferenz nach 1 h beträgt 132,2°C in 5 cm Tiefe (Spalte 2 und 3). Nach 12 h fällt der Unterschied praktisch gleich aus (132,1°C) und tritt in der gleichen Tiefe auf (5 cm).

Während eines Brandes (und für eine gewisse Zeit danach) kann die in den Boden eindringende Wärme dazu führen, dass Wasser aus dem Boden verdunstet, vor allen in den oberflächennahen Segmenten. Dadurch sinkt dort der Wassergehalt, so dass auch D_{th} abnehmen kann. (Nach Wieting et al. (2017) reduziert die Verdunstung vorübergehend auch die Wärmeentwicklung, worauf hier aber nicht näher eingegangen wird.) In Lehm- und Tonböden hält die Bodenmatrix unterhalb der Wassergehalte, bei denen D_{th} in solchen Böden geringer wird (15 bzw. 20%-Vol.), das Wasser sehr fest, so dass es nur schwer verdunsten kann (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Eine Auswirkung auf D_{th} ist daher zwar nicht auszuschließen, aber eher selten. Bei Sandböden dagegen wird das Wasser zumindest oberhalb von 10%-Vol. nicht so fest gehalten (Ad-hoc-AG Boden, 2005), so dass hier eine Abnahme von D_{th} infolge einer Austrocknung des Bodens schon vorkommen kann.

Das Austrocknen eines Bodens durch Wärme kann man mit einem entsprechenden Computerprogramm recht genau simulieren, aber das ist sehr aufwändig. Um abzuschätzen, wie sich ein Austrocknen und damit verbundenes Abnehmen von D_{th} auf die Erwärmung eines Bodens auswirkt, kann man ähnlich vorgehen wie bei der Humusaufgabe: Man berechne zunächst die Temperaturverteilung im Bodenprofil mit einem D_{th} ohne Austrocknung. Dann wiederhole man die Berechnungen mit einem reduzierten D_{th} -Wert in den oberen Segmenten. Der Effekt eines Brandes auf die Bodentemperaturen liegt dann wieder irgendwo dazwischen.

Das ist in Abbildung 7 und Tabelle 4 für einen fiktiven Sandboden illustriert. Wenn die obersten 10 cm des Bodens ein geringeres D_{th} aufweisen ($D_{th} = 0,0024 \text{ cm}^2/\text{s}$) als der Rest ($D_{th} = 0,0064 \text{ cm}^2/\text{s}$), dringt die Wärme nicht so weit in ihn ein und die Temperaturen sind geringer als wenn der gesamte Boden den höheren D_{th} -Wert aufweist. Die 200, 100 und 50°C Linie erreichen nach 1 h ohne Austrocknung ca. 5, 8,5 und 12 cm Tiefe (Spalte 2), mit Austrocknung dagegen nur etwa 3, 5 und 7 cm Tiefe (Spalte 3). Die nach 12 h erreichten Tiefen sind wesentlich größer, nämlich 17, 30 und 41,5 cm ohne Austrocknung (Spalte 4), bzw. 8, 20 und 32,5 cm mit Austrocknung (Spalte 5). Die größte Temperaturdifferenz nach einer Stunde beträgt 89,8°C und tritt in 5 cm Tiefe auf (vgl. Spalte 2 und 3). Nach 12 Stunden

ist immer noch der gleiche Trend zu erkennen, allerdings ist die maximale Differenz größer, nämlich 109°C in 9 cm Tiefe (vgl. Spalte 4 und 5).

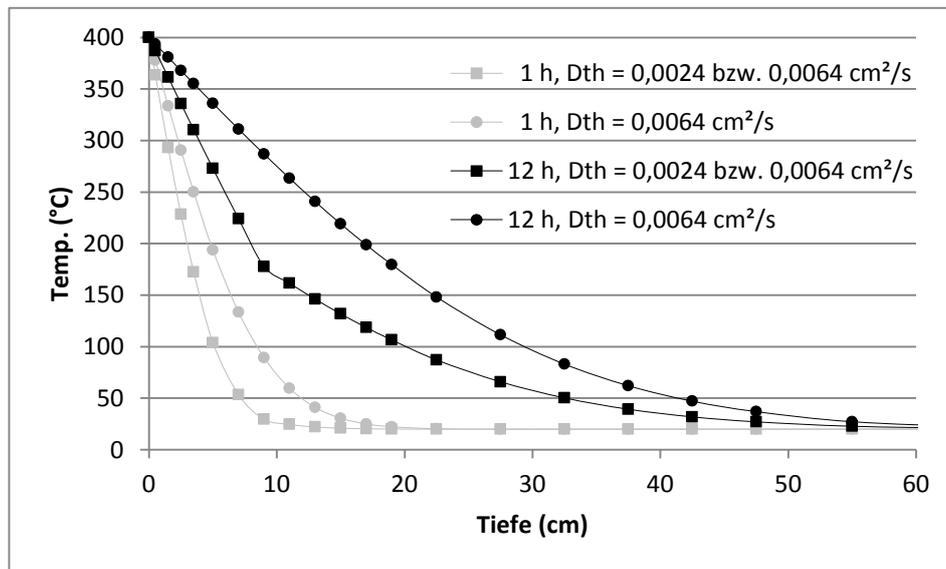


Abbildung 7: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil mit $D_{th} = 0,0024 \text{ cm}^2/\text{s}$ in den obersten 10 cm und $D_{th} = 0,0064 \text{ cm}^2/\text{s}$ darunter bzw. $D_{th} = 0,0064 \text{ cm}^2/\text{s}$ im gesamten Profil, nachdem an der Oberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde bzw. 12 Stunden gebrannt hat. Anfangstemperatur in allen Bodensegmenten = 20°C

Abschließend ist noch zu beachten, dass nicht alle Böden gleicher Textur genau die gleichen D_{th} -Werte bei einem gegebenen Wassergehalt aufweisen. Die D_{th} -Werte können sich durchaus um 10 bis 20% unterscheiden.

4.2 Randbedingungen

Oberer Rand

Das Segment $i = 0$ bildet den oberen Rand des zu betrachtenden Bodenprofils und entspricht hier der Bodenoberfläche. Von dort wird die Wärme aus einem Feuer in das Bodenprofil eingetragen. Um den zeitlichen Verlaufs der Temperaturen in den inneren Segmenten $i = 1$ bis $i = n$ berechnen zu können, muss man einen Wert für die Temperatur des Feuers an der Bodenoberfläche sowie dessen Dauer ansetzen. Weiterhin muss man den Temperaturverlauf während der Abkühlungsphase nach dem Feuer beschreiben und die Länge dieser Phase festlegen. Die Temperatur in Segment $i = 0$ (T_0) bzw. ihr Verlauf wird als obere Randbedingung bezeichnet. Sie hat hier zwei Phasen, nämlich eine Feuerphase und eine Abkühlungsphase. Für jeden Zeitpunkt in beiden Phasen wird ein Wert für T_0 gebraucht.

Tabelle 4: Temperatur in verschiedenen Tiefen eines Sandbodens (Spalte 1), nachdem an der Bodenoberfläche ein Feuer mit 400°C für 1 Stunde (Spalte 2 und 3) bzw. 12 Stunden (Spalte 4 und 5) gebrannt hat. Gleiches D_{th} bedeutet $D_{th} = 0,0064 \text{ mm}^2/\text{s}$ in allen Segmenten, variables D_{th} bedeutet $D_{th} = 0,0024 \text{ cm}^2/\text{s}$ bis in 10 cm Bodentiefe und $D_{th} = 0,0064 \text{ cm}^2/\text{s}$ in allen darunter folgenden Segmenten. Anfangstemperatur in allen Bodensegmenten = 20°C.

Bodentiefe [cm]	1 Stunde gleiches D_{th}	1 Stunde variables D_{th}	12 Stunden gleiches D_{th}	12 Stunden variables D_{th}
0,0	400,0	400,0	400,0	400,0
0,5	377,7	363,6	393,6	387,1
1,5	333,5	293,0	380,7	361,4
2,5	290,7	228,3	367,9	335,8
3,5	250,1	172,5	355,1	310,4
5,0	193,7	103,9	336,1	272,8
7,0	133,5	53,5	311,1	224,2
9,0	89,4	29,5	286,8	177,8
11,0	59,6	24,6	263,3	161,5
13,0	41,1	22,1	240,7	146,1
15,0	30,6	20,9	219,1	131,8
17,0	25,0	20,4	198,7	118,6
19,0	22,3	20,1	179,5	106,5
22,5	20,4	20,0	148,1	87,1
27,5	20,0	20,0	111,5	65,9
32,5	20,0	20,0	83,1	50,3
37,5	20,0	20,0	62,1	39,3
42,5	20,0	20,0	47,1	31,9
47,5	20,0	20,0	37,0	27,1
55,0	20,0	20,0	27,2	22,8
65,0	20,0	20,0	22,3	20,8
75,0	20,0	20,0	20,6	20,2
85,0	20,0	20,0	20,2	20,1
95,0	20,0	20,0	20,0	20,0
110,0	20,0	20,0	20,0	20,0
130,0	20,0	20,0	20,0	20,0
150,0	20,0	20,0	20,0	20,0
170,0	20,0	20,0	20,0	20,0
190,0	20,0	20,0	20,0	20,0
210,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Es ist zu vermuten, dass ein Feuer etwas Zeit braucht, um seine endgültige Temperatur zu erreichen (z.B. Sackett und Haase, 1992). Die uns dazu bekannten Daten reichen nicht aus, diesen Anstieg mathematisch zu beschreiben. Sinngemäß gilt das Gleiche für den Temperaturabfall gegen Ende des Feuers. Für die Berechnungen wird daher davon ausgegangen, dass das Feuer über seine gesamte Dauer eine konstante Temperatur T_0 an der Bodenoberfläche hat. Diesen Wert sowie die Dauer des Feuers kann der Nutzer selbst festlegen. Im Computerprogramm wird dieser Teil der oberen Randbedingung wie folgt formuliert:

$$\text{IF } \text{time} \leq t_{\text{fire}} \text{ THEN } T_0 = T_f \quad [22]$$

time = Zeit seit Beginn des Feuers [h]

t_{fire} = Dauer des Feuers [h]

T_0 = Temperatur im Segment $i = 0$ [°C]

T_f = Temperatur des Feuers [°C]

Der „IF“-Zusatz besagt, dass diese Gleichung nur während des Brandes gilt.

Wenn das Feuer aus ist, beginnt die Abkühlungsphase. An deren Anfang entspricht die Temperatur an der Bodenoberfläche noch der Brandtemperatur, also $T_0 = T_f$. Danach kühlt die Oberfläche gemäß dem Newtonschen Abkühlungsgesetz exponentiell ab, so dass:

$$\text{IF } t_{\text{fire}} < \text{time} \leq (t_{\text{fire}} + t_{\text{cool}}) \text{ THEN } T_0 = T_f \cdot e^{-k \cdot (\text{time} - t_{\text{fire}})} \quad [23]$$

t_{cool} = Dauer der Abkühlungsphase [h]

k = Abkühlungskoeffizient [1/h]

Das Minuszeichen vor dem k in [23] wurde eingefügt um zu verdeutlichen, dass T_0 hier exponentiell mit der Zeit abnimmt. Der „IF“-Zusatz besagt hier, dass diese Gleichung nur ab dem Ende des Brandes (t_{fire}) bis zum Ende der Abkühlungsphase ($t_{\text{fire}} + t_{\text{cool}}$) zutrifft. Danach gilt:

$$\text{IF } \text{time} > (t_{\text{fire}} + t_{\text{cool}}) \text{ THEN } T_0 = T_{\text{ini}} \quad [24]$$

T_{ini} = Temperatur der Bodenoberfläche vor dem Feuer [°C]

T_{ini} kann ebenfalls vom Nutzer gewählt werden. Wenn man für alle inneren Segmente die gleiche Anfangstemperatur ansetzt, z.B. 20°C, kann man diese auch für T_{ini} verwenden.

Über die Dauer der Abkühlungsphase t_{cool} verringert sich T_0 von T_f auf die Temperatur der Bodenoberfläche vor dem Feuer (T_{ini}). Am Ende der Abkühlungsphase sieht [23] dann wie folgt aus:

$$T_{\text{ini}} = T_f \cdot e^{-k \cdot t_{\text{cool}}} \quad [25]$$

Nach einigen Umstellungen kann man daraus den Koeffizienten k berechnen:

$$\frac{T_{ini}}{T_f} = e^{-k \cdot t_{cool}} \Rightarrow \ln \frac{T_{ini}}{T_f} = -k \cdot t_{cool} \Rightarrow k = -\frac{\ln \frac{T_{ini}}{T_f}}{t_{cool}} \quad [26]$$

Die Dauer der Abkühlungsphase ist frei wählbar. In Abwesenheit entsprechender Daten scheint uns eine Abkühlungsphase, die so lange dauert wie der Brand, ein vertretbarer erster Ansatz zu sein, so dass $t_{cool} = t_{fire}$. Die Gesamtdauer eines Berechnungslaufs (t_{run}) sollte doppelt so lang sein wie $t_{fire} + t_{cool}$, also $t_{run} = 2 \cdot (t_{fire} + t_{cool})$, da auch nach Ende der Abkühlungsphase noch eine merkliche Umverteilung der Wärme in Boden stattfindet. Das wird später anhand einiger Beispielrechnungen gezeigt.

Unterer Rand

Das Segment $i = n+1$ bildet den unteren Rand des zu betrachtenden Bodenprofils. Auch für dieses Segment muss man einen Wert für die Temperatur einsetzen (T_{n+1}), die hier für den Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Das ist die untere Randbedingung. Wenn man für alle inneren Segmente die gleiche Anfangstemperatur wählt, z.B. 20°C, kann man diesen Wert auch als untere Randbedingung einsetzen. Ansonsten sind 10°C ein plausibler Wert, was zu Beginn von Kapitel 4.1 bereits erklärt wurde.

Das zu untersuchende Bodenprofil muss so tief angelegt werden, dass die untere Randbedingung den Wärmeeintrag nicht beeinflusst. Das ist dann gewährleistet, wenn sich im Segment über dem unteren Rand ($i = n$) die Temperatur, die dort zu Beginn der Berechnungen eingesetzt wurde, nicht wesentlich ändert (z.B. $< 0,1^\circ\text{C}$). Wenn das nicht der Fall ist, bedeutet das, dass die untere Randbedingung ein weiteres Eindringen der Wärme verhindert.

5. Computerprogramm

5.1 Allgemeines

Das Computerprogramm wurde in der Programmiersprache BASIC, Version QB64, geschrieben. Diese Sprache wurde gewählt, weil sie gut verständlich ist und die notwendige Software kostenlos über das Internet erhältlich ist.

Das Programm ist auf Verständlichkeit ausgelegt und daher an einigen Stellen aus programmiertechnischer Sicht nicht optimal formuliert. Es ist von der Leitstelle des Bundes für Kampfmittelräumung im Niedersächsischen Landesamt für Bau und Liegenschaften in elektronischer Form erhältlich. Die Adresse ist auf dem Titelblatt dieser Arbeit angegeben.

Um das Programm zu benutzen, muss man die Software QB64 aus dem Internet (kostenlos) herunterladen und installieren. Man findet sie, wenn man „QB64“ in die jeweilige Suchmaschine eintippt.

Wird QB64 gestartet, erscheinen am oberen Bildschirmrand sechs drop-down Menüs. Unter „Options“ → „Display“ kann man das QB64-Fenster auf den gerade verwendeten Bildschirm anpassen.

Wenn man das Menü „File“ öffnet, erscheint die Option „Open“ mit der das gewünschte Programm geöffnet werden kann. Drückt man auf der Tastatur die Taste F5, wird das Programm gestartet. Je nach Tastatur kann man es mit der Taste „Unterbr“ oder der Tastenkombination „Strg+Pause“ abgebrochen werden.

Wenn der Programmablauf beendet ist, sollte der Ausgabebildschirm sofort geschlossen werden, um Komplikationen, z.B. beim Start eines neuen Laufs, zu vermeiden. Sollte man es vergessen haben, erhellt sich der Bildschirm beim Start eines neuen Laufs und der Lauf beginnt nicht. Dann muss man das QB64-Symbol in der Taskleiste anklicken, wodurch der noch nicht geschlossene Ausgabebildschirm wieder in den Vordergrund rückt, und ihn jetzt unbedingt schließen.

Die in der Ausgabedatei (siehe Kapitel 5.4) abgelegten Berechnungsergebnisse kann man sich im Editor ansehen. Dateien mit den Zusatz „.dat“ können außerdem in EXCEL® eingelesen und dort weiterverarbeitet werden. Zu beachten ist, dass die Berechnungsergebnisse mit Dezimal-Punkt anstelle des in Deutschland üblichen Kommas gespeichert sind. Ist EXCEL® auf Dezimal-Punkt eingestellt, kann eine „.dat“-Datei direkt über die Befehlsfolge „Datei“ → „Öffnen“ → „Fertig stellen“ eingelesen werden. Wenn EXCEL® mit Dezimal-Komma arbeitet, müssen im Editor über den Befehl „Ersetzen“ erst alle Dezimal-Kommas durch Dezimal-Punkte ersetzt werden. Dann kann die Datei wie eben beschrieben eingelesen werden.

Das Programm ist im Kapitel 5.3 ausgedruckt und wird anschließend in Kapitel 5.4 Zeile für Zeile erläutert. Die Nummern am linken Rand des in Kapitel 5.3 wiedergegebenen Programmcodes wurden als Referenz für die zeilenweise Beschreibung der einzelnen Programmschritte eingefügt, im eigentlichen Programm gibt es diese Nummern nicht.

Die leeren Zeilen wurden in das Programm eingefügt, um es übersichtlicher zu machen.

Alles, was in einer Zeile nach dem Zeichen ' folgt, sind Bemerkungen, die der Computer nicht registriert. Sie dienen der Erläuterung für den Nutzer des Programms.

Vor einigen Programmzeilen gibt es Zahlen in 10er Schritten (10, 20, 30 etc.). Das sind Querverweise innerhalb eines Programms, um Stellen zu markieren, wohin die Ausführung des Programms unter bestimmten Bedingungen springen soll.

Mit dem Befehl „PRINT“ wird etwas auf den Ausgabebildschirm geschrieben, mit dem Befehl „PRINT#“ in eine Ausgabedatei. Eine Zeichenfolge wie z. B. ###.# bedeutet, dass der Wert einer Variablen mit drei Stellen vor und einer Stelle nach dem Komma ausgegeben wird.

Im Programm ist mehrfach der Befehl „PRINT“ oder „PRINT#“ zu finden, auf den nichts folgt. Dadurch wird eine leere Zeile auf den Ausgabebildschirm bzw. in die Ausgabedatei geschrieben, was die Ausgabe übersichtlicher macht.

In BASIC kann man keine griechischen Symbole verwenden. Sie müssen „lateinisiert“ werden, z.B. lam für λ oder dt für Δt . Subskripte können nur auf gleicher Höhe wie die Variable geschrieben werden, so dass z.B. D_{th} zu Dth wird.

Gleichungen der Form $y = y + x$ (wie z.B. in Zeile 62) sind mathematisch nur korrekt, wenn $x = 0$. Ein Computer interpretiert eine solche Gleichung aber als neues $y = \text{altes } y + x$. Das y links und rechts des Gleichheitszeichens sind für den Computer also zwei verschiedene Variablen.

Bei der Eingabe von Zahlen mit Dezimalstellen muss unbedingt ein Dezimalpunkt anstelle des in Deutschland üblichen Dezimalkommas verwendet werden, also z.B. nicht 3,14 sondern 3.14!

5.2 Liste der Variablen

Variable im Prog. Text		Beschreibung	Einheiten
a		Zwischenvariable für die Berechnung der neuen Temperatur der inneren Segmente	-
b		Zwischenvariable für die Berechnung der neuen Temperatur der inneren Segmente	-
c		Zwischenvariable für die Berechnung der neuen Temperatur der inneren Segmente	-
cc		Zählt die Zeit bis zum Speichern von Berechnungsergebnissen	s
datei\$		Variable zum Einlesen des Namens der Ausgabedatei	
dt	Δt	Zeitschritt für die Berechnungen	s
dd(i)		Entfernung des Punktes in der Segmentmitte von der Bodenoberfläche	cm
ddz(i)	ΔL	Entfernung zwischen zwei benachbarten Segmentpunkten	cm
dz(i)	dz	Dicke der Segmente	cm
Dth(i)	D_{th}	thermische Diffusivität zwischen zwei Segmentpunkten	cm ² /s
i	i	Nummer der Segments	
k	k	Abkühlungskoeffizient	1/s
lamin(i)	λ_{in_i}	Zusammenfassung mehrerer Variablen (Gleich. [13a])	-
lamout(i)	λ_{out_i}	Zusammenfassung mehrerer Variablen (Gleich. [13b])	-
n	n	Anzahl der Segmente	
pfad\$		Pfad für die Ausgabedatei	
s		Summiert die Entfernung von der Bodenoberfläche bis zum unteren Rand eines Segments und wird als Zwischenvariable für die Berechnung von dd(i) gebraucht	cm
tcool	t_{cool}	Dauer der Abkühlungsphase	h
tfire	t_{fire}	Dauer des Feuers	h
time	t	Zeit in Programmlauf	s
tpr		Intervall für das Schreiben von Berechnungsergebnissen in die Ausgabedatei	h
trun		Dauer des Programmlaufs	h
Tf	T_f	Temperatur des Feuers an der Bodenoberfläche	°C
Tini	T_{ini}	Temperatur an der Bodenoberfläche zu Beginn des Programmlaufs	°C
T(i)	T_i^t	Temperatur in einem Segment zur Zeit t	°C
Tn(i)	$T_i^{t+\Delta t}$	Temperatur in einem Segment zur Zeit t+ Δt , also die neu berechnete Temperatur	°C

5.3 Programmcode

```
1 ' Feuer-ex - ein Programm, um die eindimensionale vertikale Ausbreitung der Wärme
2 ' eines Feuers (Waldbrandes) in einem Bodenprofil mit der expliziten Lösung der
3 ' Wärmetransportgleichung zu berechnen
4
5 ' Überarbeitet 20.08.2019
6
7 CLS
8
9 DEFDBL A-Z
10
11 ' ----- Eingabe -----
12
13 n = 28
14 DIM dd(n+1), ddz(n+1), dz(n+1), T(n+1), Tn(n+1), Dth(n+1), lamin(n+1), lamout(n+1)
15
16 pfad$ = "c:\Waldbrand\"
17 INPUT "Name der Datei zum Speichern der Ergebnisse = "; datei$
18
19 g$ = pfad$ + datei$ + ".dat"
20 OPEN g$ for OUTPUT as #1
21
22 PRINT
23 INPUT "Dauer des Laufs [h] = "; trun
24 INPUT "Zeitinterval zum Speichern der Ergebnisse [h] = "; tpr
25 PRINT
26 INPUT "Temperatur des Feuers am Erdboden [°C] = "; Tf
27 INPUT "Dauer des Feuers [h] = "; tfire
28 INPUT "Dauer der Abkühlungsphase [h] = "; tcool
29
30 PRINT
31 PRINT "Möchten Sie gleiche (0) oder verschiedene (1) Dth in den Segmenten?"
32 10 INPUT "Bitte 0 oder 1 eingeben"; flag
33 IF flag <> 0 and flag <> 1 Then GOTO 10
34 IF flag = 1 THEN GOTO 20
35 INPUT "Thermische Diffusivität [cm²/s] = "; Dcm
36
37 FOR i = 1 TO n + 1
38     Dth(i) = Dcm
39 NEXT i
40
41 20 trun = trun * 3600      'conversion from h to s
42     tpr = tpr * 3600
43     tfire = tfire * 3600
44     tcool = tcool * 3600
45
46     dt = 5              '[s]
47
48 Data 0
49 Data 1,1,1,1
50 Data 2,2,2,2,2,2,2,2
51 Data 5,5,5,5,5,5
52 Data 10,10,10,10,10
53 Data 20,20,20,20,20
54 Data 20
55
```

```

56   FOR i = 0 TO n + 1
57     READ dz(i)           'thickness of each soil segment [cm]
58   NEXT i
59
60   s = 0
61   FOR i = 1 TO n + 1
62     s = s + dz(i)
63     dd(i) = s - dz(i) / 2   'distance of each node from the soil surface [cm]
64     ddz(i) = (dz(i-1) + dz(i)) / 2 'distance between two adjacent nodes [cm]
65   NEXT i
66
67   Data 20
68   Data 20,20,20,20
69   Data 20,20,20,20,20,20,20,20
70   Data 20,20,20,20,20,20
71   Data 20,20,20,20,20
72   Data 20,20,20,20,20
73   Data 20
74
75   FOR i = 0 TO n + 1
76     READ T(i)           'initial temperature of each inner node [°C]
77   NEXT i
78
79   Tini = T(0)
80   k = -log(Tini / Tfire) / tcool
81
82   IF flag = 0 THEN GOTO 30
83
84   Data .002,.002,.002,.002
85   Data .004,.004,.004,.004,.004,.004,.004,.004
86   Data .004,.004,.004,.004,.004,.004
87   Data .004,.004,.004,.004,.004
88   Data .004,.004,.004,.004,.004
89   Data .004
90
91   FOR i = 1 TO n + 1
92     READ Dth(i)         'thermal diffusivity between nodes [cm²/s]
93   NEXT i
94
95 30  FOR i = 1 TO n
96     lamin(i) = Dth(i) * dt / (dz(i) * ddz(i))
97     lamout(i) = Dth(i+1) * dt / (dz(i) * ddz(i+1))
98
99     IF lamin(i) > .5 THEN PRINT "Lösung nicht stabil, Programm beendet" : GOTO 40
100    IF lamout(i) > .5 THEN PRINT "Lösung nicht stabil, Programm beendet" : GOTO 40
101  NEXT i
102
103  ' ----- Berechnungen -----
104
105  cc = dt
106
107  FOR time = dt TO trun STEP dt
108    IF time <= tfire THEN T(0) = Tf
109    IF time > tfire and time <= (tfire + tcool) THEN T(0) = Tf * exp(-k * (time - tfire))
110    IF time > (tfire + tcool) THEN T(0) = Tini
111
112    FOR i = 1 TO n

```

```

113         a = lamin(i)
114         b = lamin(i) + lamout(i) - 1
115         c = lamout(i)
116         Tn(i) = a * T(i-1) - b * T(i) + c * T(i+1)
117     NEXT i
118
119     FOR i = 1 TO n
120         T(i) = Tn(i)
121     NEXT i
122
123     IF cc >= tpr THEN GOSUB prt
124     cc = cc + dt
125
126     PRINT "time ="; time/3600; "h"
127 NEXT time
128
129 ' -----
130
131     CLOSE #1
132
133 40 PRINT
134     PRINT "Programmlauf beendet"
135     END
136
137 ' ----- Ausgabe in Datei -----
138
139 prt:
140     PRINT #1, "time ="; time/60; "min";
141     PRINT #1, " ="; time/3600; "h"
142     PRINT #1,
143     PRINT #1, " i z (cm) T (°C)"
144     PRINT #1,
145
146     FOR i = 0 TO n+1
147         PRINT #1, USING " ## ###.# ####.#"; i; dd(i); T(i)
148     NEXT i
149
150     cc = 0
151     PRINT #1, : PRINT #1,
152
153     RETURN

```

5.4 Programmbeschreibung

<i>Zeile</i>	<i>Funktion</i>
1-5	Nennt den Namen und den Zweck des Programms sowie den Zeitpunkt seiner Fertigstellung.
7	Löscht den bisherigen Inhalt des Ausgabebildschirms.
9	Legt für alle Variablen doppelte Genauigkeit fest.
11-101	Eingabeteils des Programms.
13	Setzt die Anzahl der internen Segmente auf 28.
14	Reserviert Platz im Arbeitsspeicher für je $n+1$ Werte der genannten Variablen. BASIC beginnt mit dem Zählen bei 0, so dass $n = 28$ letztlich 29 Werten entspricht und $n+1 = 30$.
16	Der Nutzer sollte einen Ordner anlegen, in dem alle Output-Dateien (Berechnungsergebnisse) gespeichert werden können. Hier ist als Ordnername „Waldbrand“ angegeben, sowie der Pfad, wie man dort hinkommt. Gemeinsam definieren sie die Variable <code>pfad\$ = „c:\Waldbrand\“</code> . Das <code>\$</code> -Zeichen hinter „pfad“ zeigt an, dass es sich bei dieser Variablen nicht um eine Zahl, sondern um eine Buchstabenfolge handelt. Da davon ausgegangen wird, dass alle Ergebnisse in den gleichen Ordner sollen, wird dieser nicht abgefragt, sondern im Programm fixiert.
17	Fragt den Namen der Datei ab, in der die Berechnungsergebnisse dieses Laufs gespeichert werden sollen.
19	Fügt <code>pfad\$</code> und <code>datei\$</code> und den Dateityp (<code>.dat</code>) zur Variablen <code>g\$</code> zusammen.
20	Öffnet die Datei <code>g\$</code> sowie einen Zwischenspeicher (<code>#1</code>) für die Ausgabe.
23-28	Fragt die erwähnten Parameter ab.
31-32	Fragt ab, ob gleiche oder verschiedene D_{th} in den einzelnen Segmenten verwendet werden sollen. Für gleiche D_{th} muss „0“, für verschiedene „1“ für die Variable <code>flag</code> eingegeben werden.
33	Prüft, ob tatsächlich eine 0 oder 1 eingegeben wurde. Wenn nein, geht das Programm nach Zeile 32 zurück und fragt erneut nach „0“ oder „1“. Ansonsten geht es mit Zeile 34 weiter. Das Zeichen „<>“ steht in BASIC für „≠“.
34	Wenn verschiedene D_{th} für die Segmente verwendet werden sollen ist <code>flag = 1</code> und das Programm springt zu Zeile 41. Ansonsten geht es mit Zeile 35 weiter.

- 35 Fragt den Wert für D_{th} ab, wenn für alle Segmente der gleiche Wert verwendet werden soll.
- 37-39 Schleife, um den abgefragten D_{th} -Wert den einzelnen Bereichen von $i = 0$ bis $i = n+1$ zuzuordnen.
- 41-44 Rechnet die in den Zeilen 23, 24, 27 und 28 angegebenen Zeiten von Stunden in Sekunden um.
- 46 Setzt den Zeitschritt für die Berechnungen (dt) auf 5 s.
Der Zeitschritt muss so klein sein, damit die Berechnungsergebnisse hinreichend genau sind und das Stabilitätskriterium für eine explizite Lösung (Gleichung [21]) erfüllt wird. Er sollte nicht verändert werden.
- 48-54 Hinter „Data“ stehen die Dicken der insgesamt 30 Segmente (28 innere plus der obere und der untere Rand). In Zeile 48 steht die Dicke für $i = 0$, also die Bodenoberfläche (hier 0 cm). In Zeile 49 ist für die nächsten 4 Segmente ($i = 1$ bis $i = 4$) eine Segmentdicke von je 1 cm hinterlegt, etc.
- 56-58 Schleife, um die in Zeile 48-54 hinterlegten Dicken für jedes Segment von $i = 0$ bis $i = n+1$ als $dz(i)$ einzulesen.
- 60 Setzt den Wert der Hilfsvariablen s auf 0. Sie wird benötigt, um die Variable $dd(i)$ zu berechnen (Zeile 62 und 63).
- 61-65 Schleife, um die Entfernung eines Segmentpunktes von der Bodenoberfläche ($dd(i)$, Zeile 63) sowie die Entfernung zwischen zwei benachbarten Segmentpunkten ($ddz(i)$, Zeile 64, Gleichung [9]) für $i = 1$ bis $i = n+1$ zu berechnen. Für $ddz(i)$ ist i der Index des Zielsegments (siehe Kapitel 3).
- 67-73 Analog zu Zeile 48-54, aber für die Anfangstemperatur. Diese ist für alle Schichten auf 20°C gesetzt, was für die Betrachtungen hier ausreichend ist (siehe Text).
- 75-77 Schleife, um die in Zeile 67-73 hinterlegten Anfangstemperaturen für jedes Segment von $i = 0$ bis $i = n+1$ einzulesen.
- 79 Setzt die Variable T_{ini} auf die Temperatur an der Bodenoberfläche vor Beginn des Feuers. Das ist die Temperatur, die am Ende der Abkühlungsphase wieder erreicht werden soll.
- 80 Berechnet den Abkühlungskoeffizienten (Gleichung [26]).
- 82 Wenn das gleiche D_{th} für alle Segmente verwendet werden soll, ist $flag = 0$ und das Programm springt zu Zeile 95. Wenn $flag = 1$ geht es mit Zeile 84 weiter.

- 84-89 Analog zu Zeile 48-54, aber für D_{th} . Es ist hier in den obersten vier Bereichen auf $0,002 \text{ cm}^2/\text{s}$ gesetzt, für alle anderen auf $0,004 \text{ cm}^2/\text{s}$. Der Nutzer kann die Werte nach Bedarf ändern (siehe Text).
- Für $i = 0$ gibt es keinen Wert, da die D_{th} immer für den Übergang von einem Segment zum nächsten ausgewiesen werden und D_{th} jeweils den Index des Zielsegments erhält (siehe Text).
- 91-93 Schleife, um die in Zeile 84-89 hinterlegten die D_{th} -Werte für jeden Segmentübergang von $i = 1$ bis $i = n+1$ einzulesen. i ist hier der Index des Zielsegments (siehe Kapitel 3).
- 95-101 Schleife, um den Parameter λ für den Wärmefluss in ein Element i hinein ($\text{lamin}(i)$, Gleichung [13a]) in Zeile 96, bzw. aus einem Element i heraus ($\text{lamout}(i)$, Gleichung [13b]) in Zeile 97 zu berechnen. Anschließend wird geprüft (Zeile 99 und 100), ob diese beiden Parameter das Stabilitätskriterium für eine explizite Lösung (Gleichung [21]) erfüllen. Wenn nicht, wird das auf dem Bildschirm angezeigt und das Programm durch einen Sprung zu Zeile 133 beendet.
- Durch die Wahl eines kleinen Zeitschritts von $dt = 5 \text{ s}$ ist die Stabilität hier gewährleistet. Falls man aber ein zu großes D_{th} verwendet, es müsste allerdings jenseits aller physikalisch sinnvollen Werte liegen, oder die Segmentdicken deutlich $< 1 \text{ cm}$ macht, wofür es aber keinen Grund gibt, kann es zur Nichteinhaltung kommen.
- 103-127 Berechnungsteil des Programms.
- 105 Setzt die Variable cc auf den Anfangswert dt . Sie zählt die Zeit bis zum Speichern der Berechnungsergebnisse.
- 107-127 Schleife für die Berechnung der expliziten Lösung
- 108 Prüft, ob das Feuer brennt ($\text{time} \leq t_{\text{fire}} ?$). Wenn ja, wird die Temperatur der Bodenoberfläche auf die Feuertemperatur gesetzt ($T_0 = T_f$, Gleichung [22]). Ansonsten geht es mit Zeile 109 weiter.
- 109 Prüft, ob das Feuer vorbei ist ($\text{time} > t_{\text{fire}}$) und man sich in der Abkühlungsphase befindet ($\text{and } \text{time} \leq (t_{\text{fire}} + t_{\text{cool}}) ?$). Wenn ja, wird die Temperatur der Bodenoberfläche mit Gleichung [23] berechnet. Ansonsten geht es mit Zeile 110 weiter.
- 110 Prüft, ob die Abkühlungsphase vorbei ist ($\text{time} > (t_{\text{fire}} + t_{\text{cool}}) ?$). Wenn ja, wird die Temperatur der Bodenoberfläche auf T_{ini} (siehe Zeile 79) gesetzt ($T_0 = T_{\text{ini}}$, Gleichung [24]). Ansonsten geht es mit Zeile 112 weiter.

- 112-117 Schleife für die Berechnung der neuen Temperaturwerte in den inneren Segmenten ($T_n(i)$).
- 113-115 Definiert die Koeffizienten vor den Temperaturen in Gleichung [20] als a, b und c, damit in der folgenden Zeile 116 Gleichung [20] etwas übersichtlicher wird.
- 116 Löst Gleichung [20]
- 119-121 Schleife, um die gerade berechneten neuen Temperaturen für die inneren Segmente $i = 1$ bis $i = n$ zu den Ausgangstemperaturen für den nächsten Rechenschritt zu machen.
- 123 Prüft, ob es Zeit ist Berechnungsergebnisse zu speichern ($cc \geq t_{pr}$?). Wenn ja, springt das Programm zur subroutine „prt“ in Zeile 139. Ansonsten geht es mit Zeile 124 weiter.
- Wegen der Art und Weise, wie ein Computer Zahlen darstellt, ist z.B. $1 + 1$ nicht unbedingt genau 2. Das liegt daran, dass 1 z.B. als 1.000000000000001 erscheinen kann. Wenn man nun abfragt, ob $1 + 1 =$ genau 2, wäre die Antwort nein. Daher steht in der Abfrage nicht „=“ sondern „≥“, sonst könnte es passieren, das nichts ausgegeben wird.
- 124 Erhöht den Wert des Zeitzählers cc um dt.
- 126 Schreibt die Zeit des gerade beendeten Berechnungsschritts auf den Ausgabebildschirm. Dadurch hat man während des Programmlaufs eine Kontrolle, ob tatsächlich gerechnet wird, oder ob das Programm „hängt“, also nichts tut.
- 127 Ende des Berechnungsteils.
- 131 Schließt die Ausgabedatei g\$ sowie den Zwischenspeicher #1.
- 134 Schreibt „Programmlauf beendet“ auf den Ausgabebildschirm und zeigt damit an, dass das Programm nun beendet ist.
- 135 Formales Ende des Programms.
- 137-153 Ausgabeteils des Programms.
- 139 Beginn der Ausgabesubroutine „prt“.
- Eine „subroutine“ muss immer nach dem formalen Ende des Programms stehen.
- 140-141 Schreibt die Zeit, für die nun Berechnungsergebnisse in die Ausgabedatei geschrieben werden, in [min] und [h] über die Ergebnisse.
- 144 Schreibt den Namen der Variablen, deren Werte in der Schleife in Zeile 146-148 in die Ausgabedatei geschrieben werden, und die dazugehörigen Einheiten über die

Ausgabespalten. (i = Nummer des Segments, z (cm), Tiefe des Segmentmittelpunktes

146-148 Schleife, um für jedes Segment die Nummer (i), seine Entfernung von der Bodenoberfläche ($dd(i)$) sowie die gerade für die Zeit „time“ neu berechnete Temperatur ($T(i)$) in die Ausgabedatei zu schreiben.

Das USING " ## ###.# ####.#" gibt an, mit wie viel Stellen (#) vor und nach dem Komma die einzelnen Variablen ausgegeben werden.

Man beachte, dass in der Schleife in Zeile 199-121 $T(i) = T_n(i)$ gesetzt wurde, so dass $T(i)$ nun der neu berechneten Temperatur entspricht.

150 Setzt den Zeitzähler cc auf 0 zurück.

153 Besagt, dass das Programm nun an das Ende der Zeile zurückkehren soll, von wo es in die subroutine „prt“ gesprungen ist (hier Zeile 123). Da diese Programmzeile bereits ausgeführt wurde, geht es mit Zeile 124 weiter.

6. Beispielrechnungen

Zweck des hier vorgestellten Wärmetransportprogramms ist es abzuschätzen, ob an einem beliebigen Standort die Gefahr besteht, dass im Falle eines (Wald)Brandes Munition, die dort im Boden verborgen sein könnte, umgesetzt wird (explodiert). Dazu muss ermittelt werden, bis zu welcher Tiefe Wärme aus einem Brand in den Boden eindringt und eine kritische Temperatur für eventuell im Boden befindliche Munition hervorrufen kann. Diese Tiefe hängt hauptsächlich von drei Faktoren ab:

- 1) Temperatur des Brandes an der Bodenoberfläche.
- 2) Dauer des Brandes.
- 3) Thermische Diffusivität (D_{th}) des Bodens, die von der Bodenart und, insbesondere bei Sanden, vom Wassergehalt des Bodens abhängt.

Welche Temperatur und welche Dauer ein Brand an einem gegebenen Standort haben wird, kann man vorher nicht wissen. Man muss daher verschiedene Varianten in Betracht ziehen, also Berechnungen mit verschiedenen Brandtemperaturen und -dauern durchführen. Die Bodenart am Standort wird man dagegen mit einiger Sicherheit ermitteln können und somit auch einen ungefähren Wert für D_{th} . Dennoch empfiehlt es sich, die Berechnungen auch mit einer gewissen Spannbreite von plausiblen D_{th} -Werten durchzuführen.

Fazit des Ganzen ist, dass man immer eine Reihe von Berechnungen braucht, um die Gefährdung einzuschätzen. Für die Beispielrechnungen hier haben wird daher drei verschiedene Brandtemperaturen (200, 400 und 800°C), eine Branddauer von 12 h (plus eine Abkühlungsphase von 12 h) und drei D_{th} -Werte (0,002, 0,004 und 0,006 cm²/s) betrachtet.

Der Effekt geringerer D_{th} -Werte in den oberen Segmenten eines Bodenprofils wegen einer Humusaufgabe oder eines Austrocknens der Segmente wird hier nicht berücksichtigt. Zum einen wurde darauf bereits in Kapitel 4.1 eingegangen, zum anderen soll hier nun der ungünstigste Fall berechnet werden. Die gewählte Branddauer von 12 h ist recht lang und repräsentiert damit auch einen diesbezüglich sehr ungünstigen Fall. Die Brandtemperatur von 800°C liegt über den in Kapitel 2 aufgeführten 700°C für Wald mit viel Brennmaterial, für den die höchsten Temperaturen zu erwarten sind (abgesehen von kurzfristigen Werten, die bis zu 1.500°C erreichen können). Er bietet sich aber an, weil dann mit 200, 400 und 800°C jeweils eine Verdoppelung der Brandtemperatur betrachtet wird.

Die Berechnungsergebnisse für verschiedene Zeiten während des Brandes und nach seinem Ende sind in Abbildung 8 bis 10 dargestellt. Gerechnet wurde bis 210 cm Bodentiefe, die Ergebnisse werden aber nur bis 60 cm Bodentiefe angezeigt. Aus den Abbildungen kann man für die Tiefe, bis in die eine bestimmte Temperatur erreicht wird (z.B. 200, 100 oder 50°C), folgendes ablesen:

- Je höher die Brandtemperatur, desto größer die Eindringtiefe.
- Je länger die Branddauer, desto größer die Eindringtiefe.
- Je höher D_{th} , desto größer die Eindringtiefe.
- In der Abkühlungsphase kann die Temperatur in der Tiefe noch ansteigen, auch wenn sich die Bodenoberfläche bereits stark abgekühlt hat.

Im schlimmsten hier betrachteten Fall ($T_f = 800^\circ\text{C}$, $t_{fire} = 12\text{ h}$, $D_{th} = 0,006\text{ cm}^2/\text{s}$) erreicht die 200°C -Linie nach 12 h Branddauer nur etwa 27,5 cm Tiefe. Während der Abkühlungsphase dringt sie jedoch noch bis in 32,5 cm Tiefe vor, die 19 h nach Beginn des Brandes erreicht wird. (Die Temperaturverteilung nach 19 h ist nicht dargestellt, unterscheidet sich aber nur wenig von der nach 18 h, die gezeigt ist.) Die 100°C -Line erreicht nach 12 h Brand 37,5 cm und 33 h nach Brandbeginn noch 52,5 cm. Die korrespondierenden Werte für die 50°C -Linie sind 47,5 cm nach 12 h und 88 cm nach 67 h. (Die Temperaturprofile 33 und 67 h nach Brandbeginn sind nicht gezeigt). Man muss also auf jeden Fall die Abkühlungsphase berücksichtigen.

Beim Anfertigen dieser Arbeit lagen uns keine dazu Angaben vor, bei welchen Temperaturen für welche Art von Munition die Gefahr besteht zu explodieren. Das zu ermitteln war auch nicht Gegenstand der Arbeit. Daher haben wir hier stellvertretend mehrfach die Tiefe erwähnt, bis zu der 200, 100 bzw. 50°C erreicht werden. Wenn korrekte „Zündungstemperaturen“ vorliegen, kann man die entsprechenden Tiefen auf die gleiche Weise ermitteln.

Wie oben schon erwähnt, kann man vorher nicht wissen, welche Temperatur sich bei einem Brand entwickeln wird. Die in Kapitel 2 aufgeführte Spannweite von 200 bis 700°C ist groß. Diesbezüglich könnte es sich lohnen bei den zuständigen Stellen in Landkreisen, in denen in den letzten Jahren größere Waldbrände stattgefunden haben, nachzufragen, ob und welche Erkenntnisse zu Brandtemperaturen und zum sonstigen Brandgeschehen vorliegen. Vor allem die Branddauer ist hier noch von Interesse.

Aus der Literatur geht eindeutig hervor, dass die eigentliche Feuerfront (mit großen Flammen) in relativ kurzer Zeit vorbeizieht. Die zurückbleibende Glut bzw. Schwelbrände können aber noch lange danach viel Hitze entwickeln. Schwelbrände können sowohl klein- als auch großflächig sein. Das ist in Bezug auf das hier verwendete Wärmetransportmodell relevant: Es ist eindimensional in der vertikalen Richtung, aber an den Rändern eines Glutnests oder Schwelbrands dringt die Wärme nicht nur senkrecht in den Boden ein, sondern breitet sich auch seitlich im Boden aus, der Wärmetransport ist also dreidimensional. Bei sehr kleinen Brandflächen, z.B. 1 m^2 , sind die Berechnungsergebnisse daher falsch, denn es werden zu hohe Temperaturen in zu großen Tiefen ermittelt. Bei Brandherden von mehreren m^2 Größe ist der Fehler am Rand zwar immer noch da, aber in

der Mitte sind die Ergebnisse korrekt. Das eindimensionale Model berechnet somit den schlimmsten Fall, was in Bezug auf Sicherheit aber eher von Vorteil ist.

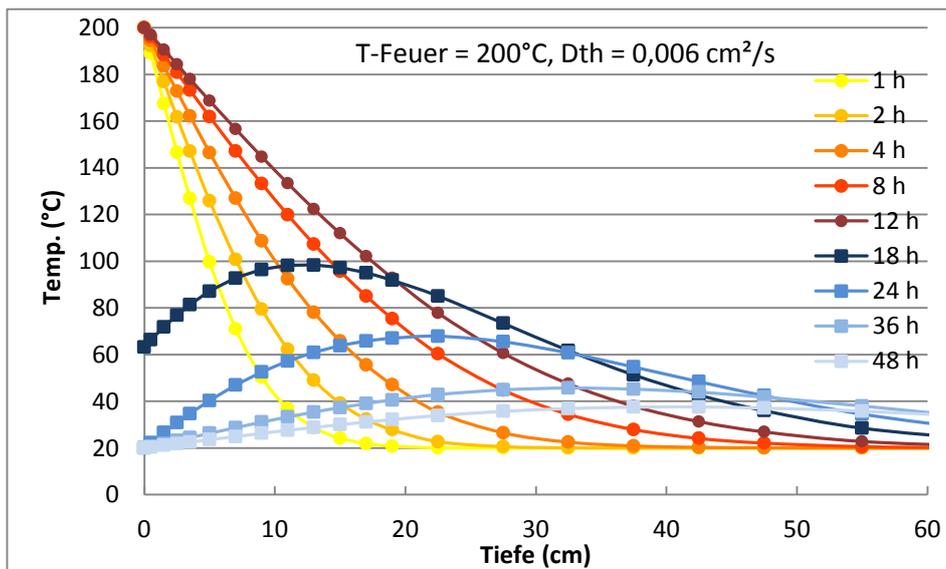
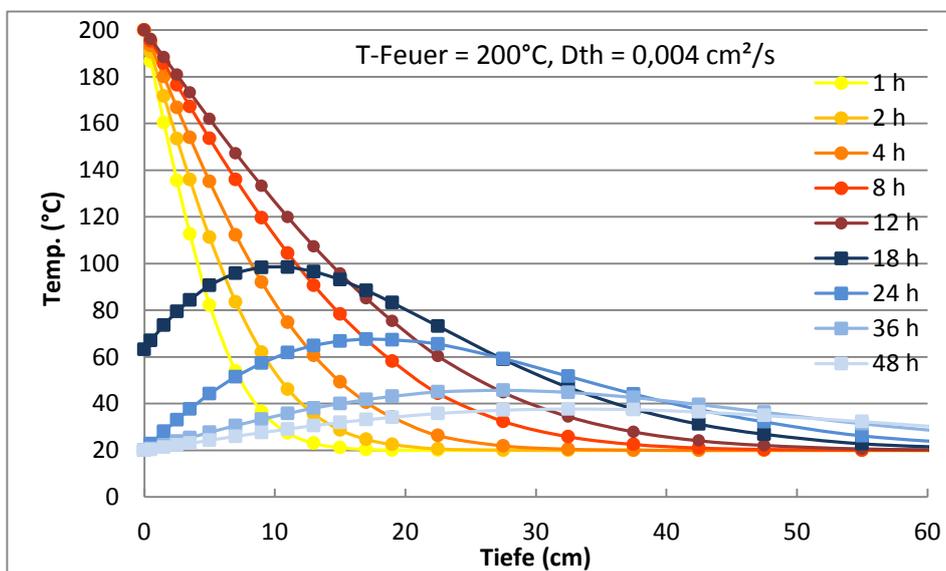
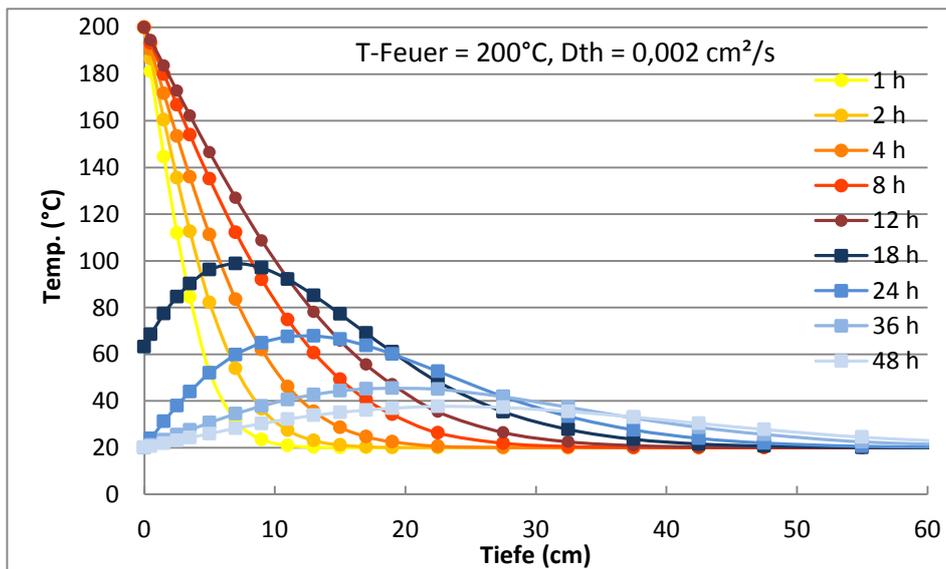


Abbildung 8: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil zu verschiedenen Zeiten nach Beginn eines Feuers mit 200°C an der Bodenoberfläche und einer thermischen Diffusivität des Bodens (D_{th}) von 0,002, 0,004 bzw. 0,006 cm^2/cm . Branddauer = 12 h, Abkühlungsphase = 12 h, Betrachtungszeitraum = 48 h

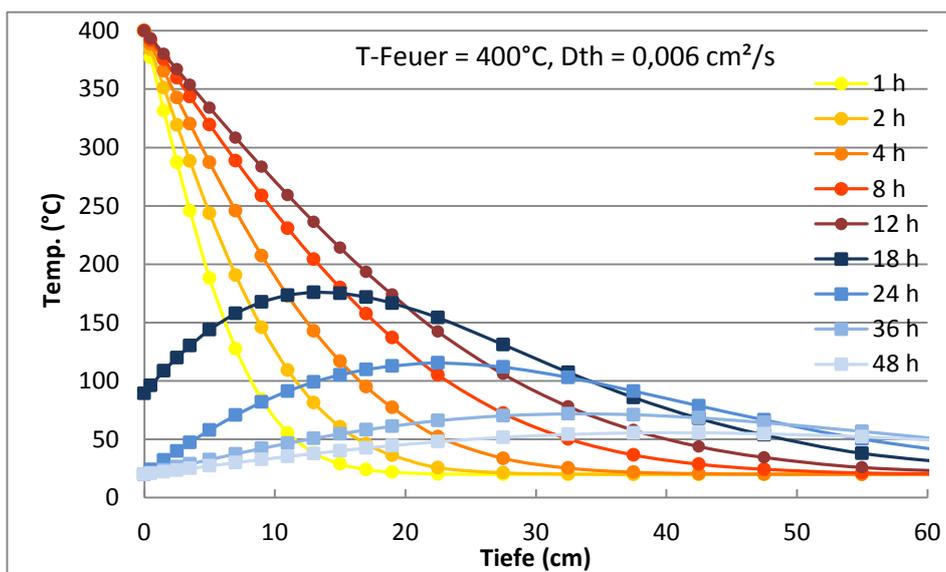
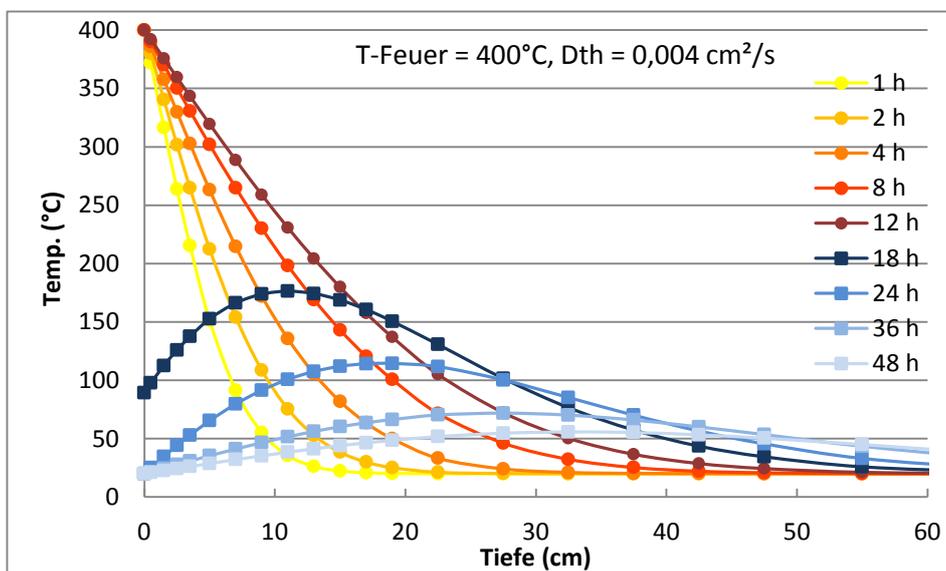
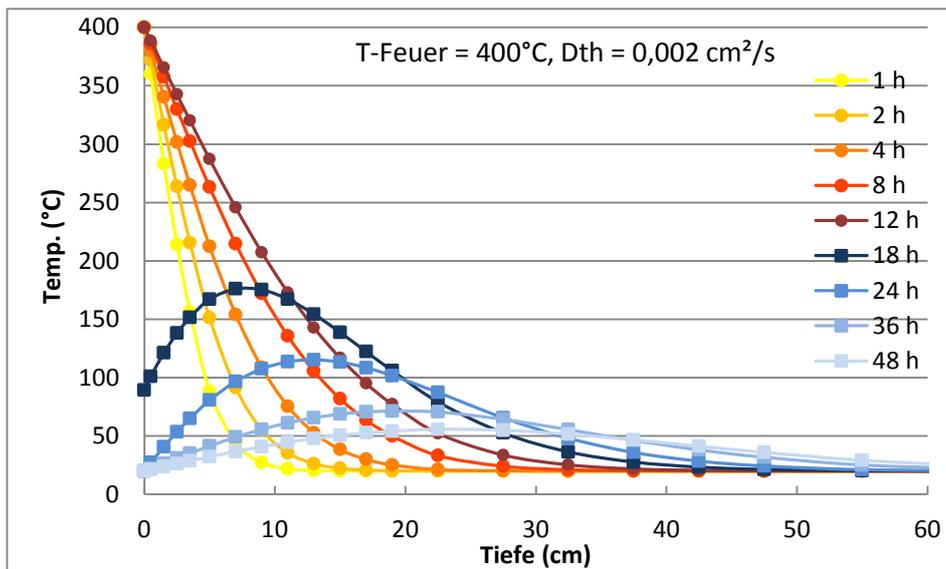


Abbildung 9: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil zu verschiedenen Zeiten nach Beginn eines Feuers mit 400°C an der Bodenoberfläche und einer thermischen Diffusivität des Bodens (D_{th}) von 0,002, 0,004 bzw. 0,006 cm^2/cm . Branddauer = 12 h, Abkühlungsphase = 12 h, Betrachtungszeitraum = 48 h

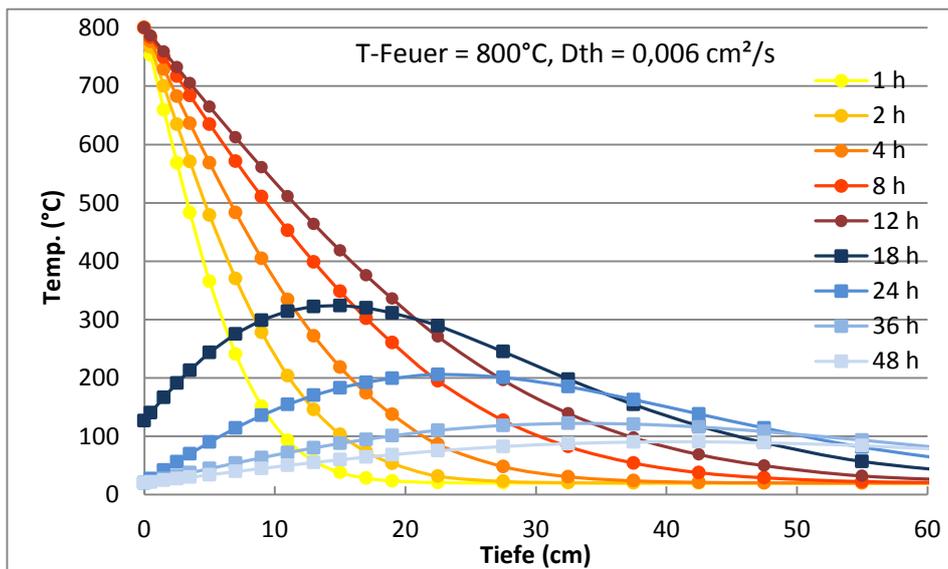
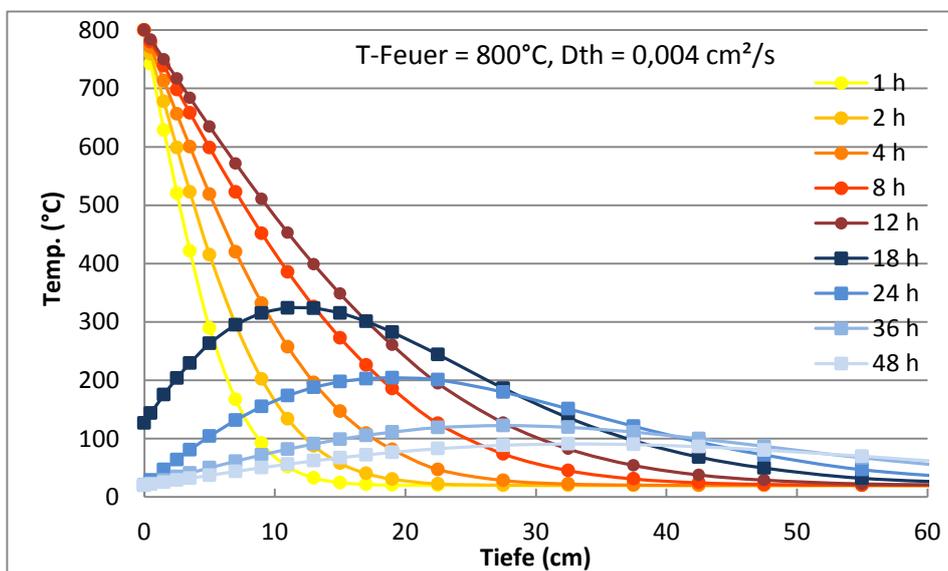
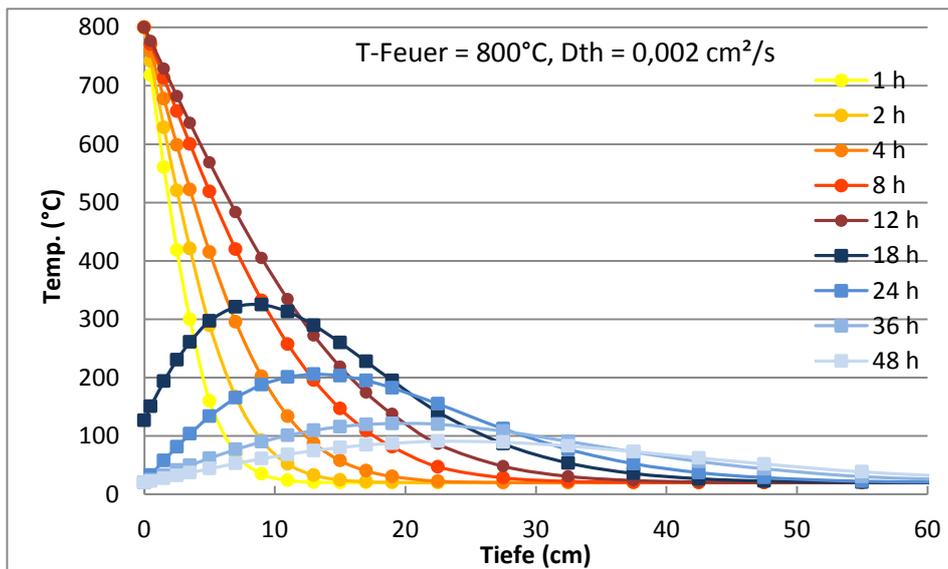


Abbildung 10: Berechneter Temperaturverlauf in einem Bodenprofil zu verschiedenen Zeiten nach Beginn eines Feuers mit 800°C an der Bodenoberfläche und einer thermischen Diffusivität des Bodens (D_{th}) von 0,002, 0,004 bzw. 0,006 cm^2/cm . Branddauer = 12 h, Abkühlungsphase = 12 h, Betrachtungszeitraum = 48 h

7. Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage. Schweizerbart, Stuttgart.
- Campbell, G.S., Norman, J.M. (1998). *An introduction to environmental biophysics*, 2nd edition. Springer, New York, USA.
- DFNK-Cluster Waldbrand (2001). *Zwischenbericht Forschungsvorhaben A2 „Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr, Arbeitspaket A. Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK) am Geoforschungszentrum (GFZ) Potsdam.*
- Ellis, P.F.M. (2013). Firebrand characteristics of the stringy bark of messmate (*Eucalyptus obliqua*) investigated using non-tethered samples. *International Journal of Wildland Fire* 22 (5), 642-651.
- Enniful, E. K. (2006). *Predicting temperature profiles during simulated forest fires*. M.Sc. thesis, Division of Environmental Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, USA.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas G.M., Torres, M.P. (2009). Forest fire effects on soil microbiology. Pages 133-175 in Cerdà, A., Robichaud, P.R. (eds): *Fire effects on soils and restoration strategies*. Science Publishers, Enfield, New Hampshire, USA.
- Molina, M.J., Llinares, J.V. (2001). Temperature - time curves at the soil surface in maquis summer fires. *International Journal of Wildland Fire* 10 (1), 45-52.
- Sacket, S.S., Haase, S.M. (1992). *Measuring soil and tree temperatures during prescribed fires with thermocouple probes*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, General Technical Report PSW-GTR-131.
- Smith, J.E., Cowan, A.D., Fitzgerald, S.A. (2016). Soil heating during the complete combustion of mega-logs and broadcast burning in central Oregon USA pumice soils. *International Journal of Wildland Fire* 25 (11), 1202-1207.
- Timm, P. (2019). *Persönliches Gespräch mit Frau Petra Timm vom Forstamt Kaliß, Landesforstbetrieb Mecklenburg-Vorpommern.*
- Wieting, C., Ebel, B.A., Singha, K. (2017). Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone Observatory. *Journal of Hydrology, Regional Studies* 13, 43-57.

Wolters, A. (2019). Persönliches Gespräch mit Herrn Andreas Wolters vom Bundesforstbetrieb Trave.

Wotton, B.M., Gould J.S., McCaw, W.L, Cheney, N.P.,Taylor, S.W. (2011). Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. International Journal of Wildland Fire 21 (3), 270-28

Umweltbundesamt (2019). Waldbrände. Abgerufen am 6. September 2019 unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende>.

Zeit (2019). Waldbrand bei Lübtheen gelöscht. Abgerufen am 6. September 2019 unter: <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2019-07/mecklenburg-vorpommern-waldbrand-luebtheen-katastrophenalarm-aufhebung>.